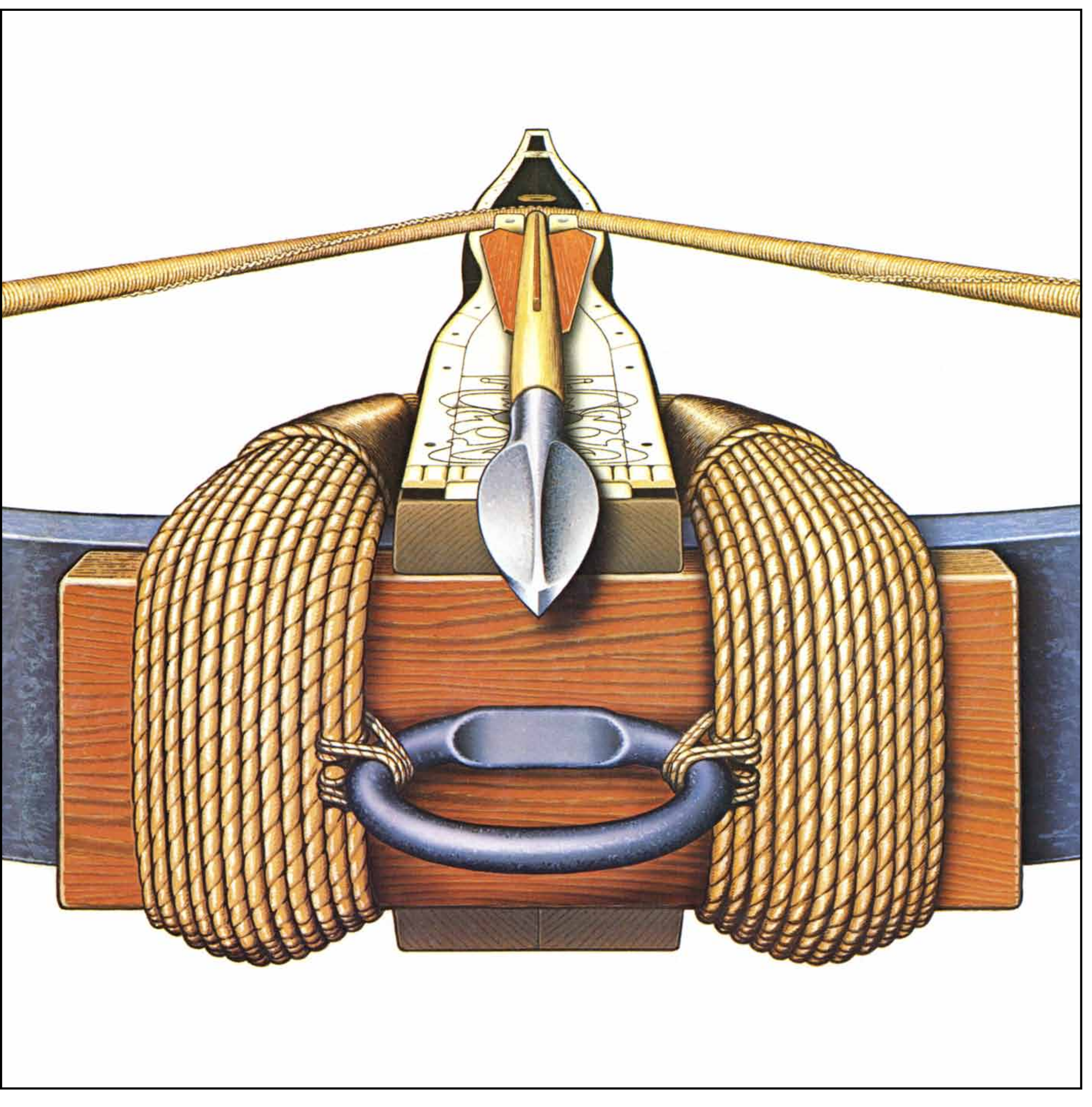
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



LA BALLESTA

Marzo 1985

PTAS. 350

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 102
Marzo 1985

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

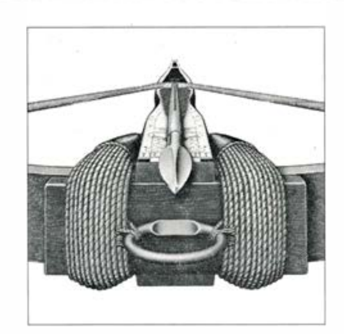
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Colapso y formación de estrellas*; Natividad Sánchez Sainz-Trápaga: *Percepción del habla en la primera infancia*; Juan-José Zarranz: *Enfermedad de Alzheimer*; Antonio Travesí: *Materia nuclear caliente*; Amando García Rodríguez: *Fiabilidad de las memorias de ordenador*; Joandomènec Ros: *Natación por propulsión a chorro en el calamar*; Leonor Vernet: *La ballesta*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Javier de Lorenzo, J. Ferrater Mora y L. Alonso



LA PORTADA

La pintura de la portada representa una ballesta inglesa que data de 1617 con su tablero o cureña de madera negra. El marfil incrustado en la superficie superior del tablero sugiere que el arco se hizo para la caza; es poco probable que una ballesta militar hubiera estado decorada de forma tan elaborada (véase "La ballesta", de Vernard Foley, George Palmer y Werner Soedel, en este mismo número). Para montar el arco, el arquero usaba probablemente una suerte de manivela, un dispositivo engranado llamado cranequín; el tablero tiene agujeros para colocar dicho mecanismo. La cuerda se ve en disposición de disparo. Se sujeta por medio de un mecanismo de disparo que puede bajarse mediante un tirón en el gatillo, el cual se encuentra en la rabera del tablero. Disparada así, la saeta de unos 30 centímetros, o la flecha, recorrerá hasta unos 370 metros. La combinación de aro y cuerda, en primer término, fija el arco al tablero. Este arco forma parte de una colección de varias ballestas que se conservan en el Museo de la Academia Militar de Estados Unidos, en West Point.

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 3850 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Hank Iken

Página	Fuente
7	Ricardo Génova e Isabel R. García (*arriba*), Isabel R. García (*abajo*)
8-12	Ricardo Génova, A. Plá, A. Chueca, J. J. Lázaro y J. López Gorgé
17	Ian Worpole
18	David F. Malin, Observatorio Anglo-Australiano
19-22	Ian Worpole
25	James Kilkelly (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
26	*Canadian Journal of Psychology*
27	Ilil Arbel
28	*Cognition*
29	Patricia K. Kuhl, Universidad de Washington
30	Ilil Arbel
34	The Liposome Company, Inc.
39	B. Leonard Holman y Thomas C. Hill
40	Daniel P. Perl
41	Dennis J. Selkoe (*arriba*), George G. Glenner (*abajo*)
42-43	Dennis J. Selkoe
44	Daniel P. Perl
45	Marek-Marsel Mesulam (*arriba*), Sally Black (*abajo*)
46	Sally Black
51-52	Douglas McWilliam, Laboratorio Lawrence Berkeley
53	Alan D. Iselin
54	Bo Jakobsson, Universidad de Lund (*arriba*); Alan D. Iselin (*centro*), Dana Beavis, Universidad de California en Riverside (*abajo*)
55-59	Alan D. Iselin
61	Robert Paz, Instituto de Tecnología de California (*arriba*); Gabor Kiss (*abajo*)
62-66	Gabor Kiss
69-71	Patricia J. Wynne
72	John M. Gosline y M. Edwin DeMont, Universidad de Columbia Británica
73-74	Patricia J. Wynne
77	The National Gallery, Londres
78	James Kilkelly
79-82	Andrew Christie, tomado de un original de Susan Canganelli
85	Ilil Arbel
90-94	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

ANTONIO PLA, ANA CHUECA, JUAN JOSE LAZARO y JULIO L. GORGE ("Asimilación del carbónico por la planta") comparten el interés por la regulación enzimática del proceso fotosintético. Los tres últimos se hallan adscritos a la Unidad de Bioquímica Vegetal de la Estación Experimental del Zaidín, Granada, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Chueca, investigador científico de este organismo, es doctor en farmacia por la Universidad de Madrid. Lázaro, colaborador científico del CSIC, es doctor en farmacia por la de Granada. López Gorgé, profesor de investigación, se recibió también en este último centro. Después de diferentes estancias en laboratorios de Inglaterra y Francia, iniciaron la línea de investigación objeto de la presente monografía, sobre la que han desarrollado varios proyectos de trabajo y dirigido tesis doctorales. Plá, doctor en farmacia también por la Universidad de Granada, es actualmente adjunto clínico de la Seguridad Social.

ALAN P. BOSS ("Colapso y formación de estrellas") es miembro del personal científico de la Institución Carnegie de Washington, a la que pertenece desde 1981. Licenciado en física por la Universidad de Florida del Sur, se doctoró por la de California en Santa Bárbara en 1979. Su interés en la formación de estrellas procede de su trabajo anterior sobre el origen de los sistemas planetarios, que le convenció de que, para establecer una teoría rigurosa de su génesis, era necesaria una mejor comprensión de la formación de las estrellas.

PETER D. EIMAS ("Percepción del habla en la primera infancia") es profesor de psicología de la Universidad Brown, desde 1968. Cursó el primer ciclo en la Universidad de Yale. Por la de Connecticut se licenció en 1959 y doctoró en 1962. Su trabajo de investigación sobre la percepción del habla durante la infancia lo viene financiando, desde 1970, el Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano de los Estados Unidos. Eimas desea manifestar su agradecimiento a Joanne L. Miller por sus comentarios a una primera versión del artículo y su asidua colaboración, que se remonta ya a diez años atrás. También quiere agradecer a Alvin M. Liberman su estímulo y sugerencias, así como el haberle posibilitado el acceso a las instalaciones de los laboratorios Haskins.

RICHARD J. WURTMAN ("Enfermedad de Alzheimer") ejerce una triple actividad docente: de regulación neuroendocrina en el departamento de nutrición del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT), en la sección de tecnología y ciencias de la salud, que comparten la Universidad de Harvard y el MIT, y en el nuevo Whitaker College de Gestión, Tecnología y Ciencias de la Salud, también del MIT. Formado en la Universidad de Pennsylvania, se licenció en medicina, en 1960, por Harvard. Con su mujer Judith, también en el MIT, investiga los mecanismos cerebrales que controlan el apetito hacia determinados alimentos. Exploran la posibilidad de que algunos trastornos del apetito, como la obesidad, puedan derivar de la alteración de esos mecanismos.

WALTER GREINER y HORST STÖCKER ("Materia nuclear caliente") son, respectivamente, profesor de física de la Universidad de Frankfurt y profesor adjunto del departamento de física y astronomía de la Universidad estatal de Michigan y del laboratorio nacional del ciclotrón superconductor de East Lansing, Michigan. Greiner, que dirige también el instituto de física teórica de la Universidad de Frankfurt, cursó el primer ciclo universitario en esa capital, la licenciatura en ciencias en la Escuela Superior Técnica de Darmstadt y se doctoró por la Universidad de Freiburg. A partir de 1978 ejerció de profesor adjunto de la Universidad de Vanderbilt y del laboratorio nacional de Oak Ridge; ha dictado cursos, en calidad de profesor visitante, en múltiples instituciones de todo el mundo. Stöcker se ha formado en la Universidad de Frankfurt, por la que se recibió de doctor en 1979. En los cursos 1979-80 y 1981-82 trabajó en la Sociedad para la Investigación de Iones Pesados, de Darmstadt, disfrutando en el 1980-81 de una beca de la OTAN, tramitada por el Servicio Alemán de Intercambio Académico, para trabajar en la división de ciencia nuclear del laboratorio Lawrence Berkeley, del que es consultor científico desde 1981.

ROBERT J. McELIECE ("Fiabilidad de las memorias de ordenador") enseña ingeniería eléctrica en el Instituto de Tecnología de California (Caltech), por el que se licenció, en 1964, y doctoró, en 1967, en matemáticas. Desde 1963 hasta 1978 trabajó en el laboratorio de propulsión a chorro del Caltech, interesándose por los problemas relacionados con las comunicaciones espaciales, interés que le condujo a su especialidad actual: la teoría de la información y la codificación. En 1978 lo contrató la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, en cuyo laboratorio de ciencias coordinadas dictó clases de matemáticas e investigó. En 1982 dejó Illinois para ocupar su actual cargo en el Caltech.

JOHN M. GOSLINE y M. EDWIN DEMONT ("Natación por propulsión a chorro en el calamar") trabajan en la Universidad de Columbia Británica, de la que Gosline es profesor adjunto de zoología y donde DeMont prepara su doctorado. Gosline se licenció en zoología por la Universidad de California en Berkeley y doctoró, por la de Duke. DeMont cursó el primer ciclo de física y biología en las universidades de King's College y de Dalhousie, Nueva Escocia, completando la licenciatura en biología en esta última. Amén de la mecánica de la natación en calamares y vieiras, Gosline y DeMont comparten otro afán: modelar la seda de araña.

VERNARD FOLEY, GEORGE PALMER y WERNER SOEDEL ("La ballesta") desempeñan, o han desempeñado, cargos docentes en la Universidad de Purdue. Foley enseña historia; Palmer se ha jubilado tras 38 años de profesar ciencias aeroespaciales y haber dirigido el laboratorio de ciencias aeroespaciales. Soedel da clases de ingeniería mecánica. Foley cursó estudios en el McPherson College y la Universidad de Kansas, doctorándose, por la de California en Berkeley, en historia de Europa, en la especialidad de historia de la ciencia y de la técnica. Centra Foley su interés en el desarrollo de máquinas en el Renacimiento y la influencia de Leonardo da Vinci sobre sus contemporáneos y seguidores inmediatos. Palmer, licenciado y doctor en ingeniería aeronáutica por el Instituto de Tecnología de California, investiga la resistencia aerodinámica de los vehículos y la resistencia al empuje aerodinámico de los edificios. Soedel nació en Praga y perteneció a la minoría alemana de los sudetes que se deportó a Alemania en 1945. Se trasladó a los Estados Unidos en 1963, formándose en Purdue, por la que se licenció en ciencias y doctoró en ingeniería mecánica, en 1967.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Llorenç Coçar fue nombrado catedrático de cirugía de la Universidad de Valencia.

Nacido en la misma Valencia hacia 1540, Coçar estudió artes y medicina en su universidad. Obtuvo el grado de bachiller en medicina el 14 de mayo de 1563 y dos días más tarde, conforme a la costumbre de la época, los de "licenciatura i doctorat". Fue alumno de las grandes figuras de la medicina valenciana de mediados de este siglo, entre ellos, el anatomista Luis Collado y el catedrático de botánica médica Juan Plaza. Como veremos, Coçar se consideraba en especial discípulo de este último.

Al terminar sus estudios, Coçar se dedicó al ejercicio profesional en la ciudad de Valencia, actividad en la que alcanzó gran prestigio, a juzgar por los cargos que ocupó dos décadas más tarde. Aparte de la cátedra de cirugía, que ocupó hasta 1591, fue nombrado "examinador de medicina" y llegó a ser "Protomédico de la Ciudad y el Reino de Valencia".

Formado en la versión renacentista del galenismo, Coçar adoptó más tarde una posición cada vez más crítica, que le llevó a convertirse en seguidor del paracelsismo. En 1589 publicó una obra, titulada *Dialogus veros medicinae fontes indicans*, en la que denunció la insuficiencia de la medicina tradicional, sobre todo en el terreno terapéutico, proponiendo una nueva fundamentación basada en los principios quemiátricos. Formalmente corresponde al género de los diálogos, tan cultivado por los científicos renacentistas. Su inicio refleja la tensión que provocó la postura abiertamente renovadora de su autor, que afirma estaba incluso decidido a abandonar la ciudad y se queja de la "ingratitud de muchos y del desprecio actual hacia las buenas artes".

En *Das Buch Paragranum*, Paracelso había hablado de cuatro columnas básicas: la filosofía, la astrología, la alquimia y la virtud (*Tugend*) o dominio del arte de curar. El libro del médico valenciano está dedicado precisamente a demostrar que son las "verdaderas fuentes y los fundamentos firmísimos de la medicina":

"Aprendí el arte de elaborar medicamentos químicos con la detenida observación de muchos experimentos y la atenta lectura de los buenos expertos en dicho arte. Gracias a ellos entendí que es doble el método universal de extracción de los licores, bálsamos y sales, uno de los cuales se basa únicamente en la técnica y el otro en la técnica y en la acción de la naturaleza, de cuyo verdadero proceso afirma Paracelso que muy pocos tienen noticia. Por ello, en cuanto las débiles fuerzas de mi entendimiento pudieron comprenderlo, me dominó un increíble deseo de comunicarlo a la posteridad. Declaré ante todos que, como resultado del conjunto de mis estudios, había llegado a la conclusión de que la medicina era peligrosísima si no era un arte perfecto y que las verdaderas fuentes y firmísimos fundamentos de la perfecta medicina son cuatro: la filosofía natural, la astrología, la alquimia y el arte de curar. Al oír esta afirmación, algunos médicos me atacaron... Decían que dos de estos cuatro fundamentos, la astrología y la alquimia, debían ser radicalmente rechazados y prohibidos bajo anatema, ya que eran artes vanas y engañosas, en modo alguno necesarias para el buen médico."

Coçar ordena su argumentación de forma muy clara y sistemática. Precisa ante todo el significado de los términos para evitar ambigüedades, expone a continuación los hechos o fenómenos que le sirven de base y concluye exponiendo las tesis que deseaba demostrar. Aunque tenga un aire "moderno", no hay que olvidar que esta ordenación era la que había impuesto la escolástica en los medios académicos:

"Me parece que para comprobar la solidez de cualquier demostración hay que comenzar por exponer dos aspectos en los que conviene que nos pongamos de acuerdo mis adversarios y yo. El primero corresponde a los significados de los términos y el segundo a los fenómenos, es decir, a las cosas que aparecen de modo manifiesto y se recogen con los sentidos, los experimentos y las observaciones. El punto de partida de todo buen razonamiento consiste en descartar cualquier homonimia y ambigüedad. Así pues, explicaré lo que significan los cuatro fundamentos citados, según mi opinión y la de Teofrasto Paracelso.

"La filosofía natural es la que investiga en general la naturaleza, constitución y causas de todo lo que sucede en el macrocosmo y en el microcosmo. En consecuencia, se ocupa, por una parte, de los cielos, de los astros y de su movimiento, luz y trayectoria, del aire, el agua y la tierra, así como de la naturaleza y alteraciones de animales, vegetales y minerales. Por otra parte, considera en profundidad la anatomía del hombre, su naturaleza, facultades, funciones y acciones, las causas y los efectos de la salud y de las enfermedades.

"Por astrología no se entiende aquí la que se refiere en general a la parte primera y universal de la filosofía, sino la que demuestra cómo la luz, el movimiento y las constituciones astrales son causas eficientes universales y externas de la salud y las enfermedades.

"No se habla aquí de alquimia en el sentido de transmutación productiva de los metales... Por el contrario, con el nombre de alquimia nos referimos a aquella parte del arte separatoria que descubre las propiedades ocultas, separando lo puro de lo impuro, y manifiesta las innumerables diferencias de las aguas, los aceites y bálsamos, los polvos y las sales...

"El arte de curar, cuarto y último fundamento de la medicina, es el método que, razonando correctamente las indicaciones, la experiencia y la analogía, permite descubrir la calidad, cantidad, ocasión y forma de usar los remedios..."

Al comenzar a exponer los fenómenos alquímicos, advierte, como todo buen observador, contra los que prefieren "volver la cabeza y taparse los oídos", antes que rechazar las doctrinas tradicionales:

"Los fenómenos alquímicos más evidentes resultan inadvertidos para los inexpertos, sobre todo para los médicos que sienten aversión a toda práctica de la filosofía y niegan la utilidad y la necesidad de este importantísimo arte. Por ello, convendría ante todo convencerles, rogándoles que por lo menos observaran las operaciones que realizan los buenos químicos. Sin embargo, muchos tienen un ánimo tan depravado que prefieren volver la cabeza y taparse los oídos por miedo de que, convencidos de la verdad, se vean obligados a reconocer que estaban equivocados. Otros, por el contrario, están dominados por un verdadero deseo de saber, hasta tal punto que anteponen el conocimiento de las cosas ocultas a todas las riquezas y placeres. En consecuencia, ignorando los primeros, expondremos algunos fenómenos de este arte en honor de los que aman la verdad.

"Todas las partes de las plantas y de los animales, aunque parezcan homogéneas, vemos que por la acción del fuego se separan en tres sustancias: el humo, llama y ceniza, si no se utiliza el arte; con su auxilio, en licor acuoso, aceite o bálsamo y sal. Por otro lado, la materia de los metales y minerales, sin el arte, se convierte por acción del fuego en ceniza o cal y humo. Con los procedimientos del arte, en cambio, se transforma en líquido, bálsamo y sal..."

Coçar subraya, en primer término, la importancia práctica que la alquimia tiene para el médico, como técnica para obtener medicamentos más eficaces:

"La experiencia demuestra cuánta potencia operativa reside en las sustancias separadas o vueltas a reunir, para conservar el estado de salud y para luchar contra las enfermedades, si las utiliza de forma prudente el médico científico y racional. No hay que pensar, como afirman los adversarios, que estos medicamentos por su eficacia nos hacen olvidar el método terapéutico, ya que cuanto más eficaz es la acción de un remedio, tanto más peligroso resulta si no se aplica el método, es decir, la razón y el orden..."

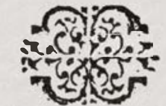
En segundo lugar, pone de relieve su importancia teórica, como método para investigar la naturaleza:

"La alquimia ofrece al médico un método más claro y completo para filosofar acerca de las partes de los animales, plantas y minerales, e investiga la naturaleza y las propiedades de casi todos los mixtos... Supongamos, por ejemplo, que se desea conocer la causa por la que el oro, el vidrio, el amianto y el talco no se inflaman, mientras que la madera, el papel y la cera arden rápidamente. El alquimista muestra al instante que en estos últimos el fuego separa fácilmente la sustancia oleosa (que llaman sulfúrea) de la acuosa y mercurial, por lo cual se inflaman. Por el contrario, en los primeros no puede separarse lo graso y lo acuoso y por esta razón no se inflaman, siendo incombustible el aceite que mediante el arte se obtiene de ellos por conversión, ya que el mercurio defiende al sulfur de la combustión. Todos los mixtos ricos en sustancia oleosa fácilmente separable de la acuosa se inflaman rápidamente, mientras que lo hacen con dificultad los que tienen poco aceite y fuertemente unido al licor acuoso. Sé de sobra que gracias a la separación química podemos investigar estas y otras muchas cosas todavía más ocultas."

El *Dialogus* no aborda de modo explícito la interpretación quemiátrica de las enfermedades del cuerpo humano, aunque por el contexto resulta evidente

DIALOGVS
VEROS MEDICINAE FONTES
INDICANS, AVCTORE
Laurentio Coçar, Valentino
Doctore Medico.

AD ILLVSTRISSIMVM
& Excellentissimum D. Don
Manricum à Lara Ducem Najarae, Comitem Valentiae. &c.



Cũm priuilegio.
VALENTIAE.
Apud Petrum Patricium.
1589.

Portada del **Dialogus**, *de Llorenç Coçar, obra en la que denunció la insuficiencia del galenismo tradicional y propuso una nueva fundamentación de la medicina basada en los principios quemiátricos del movimiento paracelsista*

que era la doctrina que Coçar seguía. Consideró quizá que era mejor exponerla en las obras más amplias que pensaba publicar, ya que era la cuestión más irritante para los seguidores de las ideas médicas tradicionales. En cualquier caso, Coçar no se limitó a incorporar los medicamentos químicos, rechazando las bases teóricas del paracelsismo, como había hecho Conrad Gessner y seguirían haciendo muchos galenistas "moderados" a lo largo del siglo XVII. El médico valenciano asimiló en profundidad los supuestos de los paracelsistas, llegando incluso a anunciar su ruptura con los fundamentos filosóficos tradicionales:

"Los fenómenos de este arte químico son admirables, pero, para entender sus causas, ¿basta con la filosofía universal de Platón y Aristóteles?

"En absoluto, como se expone en la obra sobre los elementos que he compuesto en honor de mi maestro Juan Plaza."

Coçar no llegó a publicar este tratado *De elementis*. Sin embargo, a pesar de la dura oposición de los partidarios locales del galenismo, consiguió que la Universidad de Valencia creara en mayo de 1591 una cátedra de medicamentos químicos. Su título se inspiró en el de la obra *De remediis secretis liber*, de Conrad Gessner, que a partir de 1552 había tenido muchas ediciones que alcanzaron amplia difusión en España. En la dotación se especificó que estaba destinada a la enseñanza de la preparación y administración de dichos medicamentos: "Elegeixem una Cathedra intitulada de remediis morborum secretis, et eorum usu. La persona que legirà aquella haja de mostrar a totes les persones de la manera que se han de fer, i aplicar dits remeis". El nombramiento de titular recayó en el propio Coçar, que la regentó durante un curso académico. Seguramente murió o abandonó la ciudad al año siguiente, sin que la nueva cátedra volviera a ser cubierta. A pesar de tan corto funcionamiento, constituye un caso excepcional, incluso a nivel europeo, de incorporación de los principios quemiátricos propugnados por el movimiento paracelsista a la enseñanza universitaria.

Asimilación del carbónico por la planta

La división clásica de la fotosíntesis en una etapa luminosa y otra oscura resulta insostenible ante el hecho demostrado de la fotoactivación de algunas enzimas del ciclo de Calvin

Antonio Plá, Ana Chueca, Juan José Lázaro y Julio López Gorgé

En el proceso de fotosíntesis la energía lumínica que emana del sol transforma el agua y el anhídrido carbónico de la atmósfera en hidratos de carbono. En dicha transformación queda libre oxígeno molecular que usarán, para su respiración, animales y plantas. Los bioquímicos la definen con expresiones técnicas del siguiente tenor: conversión de la radiación lumínica en potencial reductor y energético que, posteriormente, se utiliza para la reducción y asimilación de elementos biogenésicos que se encuentran en un alto estado de oxidación o en formas de baja reactividad.

Vayamos por partes. Por radiación lumínica entendemos las ondas electromagnéticas emitidas por el sol en forma de paquetes energéticos discretos (cuantos o fotones), cuya energía depende de la longitud de onda, o frecuencia, de la radiación emitida ($E = h \cdot \nu$), siendo la del espectro visible la comprendida entre longitudes de onda de 400 y 700 nanómetros. Con la expresión potencial reductor y energético se designa la cantidad de energía acumulada por el sistema en forma de equivalentes químicos de reducción o de enlaces químicos altamente energéticos, respectivamente. Los elementos biogenésicos no son otros que aquellos que forman parte de los constituyentes orgánicos: proteínas, hidratos de carbono, grasas, etcétera. De una molécula se dice que se encuentra en alto estado de oxidación cuando se halla totalmente quemada, no pudiendo admitir más oxígeno sin pérdida de su identidad; y son formas de baja reactividad aquellas que por su estructura química particular tienen escasa tendencia a reaccionar con cualquier otro compuesto químico.

El potencial reductor procede de una molécula más o menos oxidada que, por un complejo mecanismo de fotoactivación, cede equivalentes de reducción. Son éstos electrones que, transportados por una cadena secuencial de intermediarios, llegan al aceptor último, el nicotín-amín adenín dinucleótido fosfato ($NADP^+$). A lo largo de esta secuencia de reacciones de óxido-reducción se libera una energía que, en parte, se utiliza para la síntesis de enlaces energéticos en forma de ATP.

Mientras que los organismos dotados de clorofila, un pigmento vegetal, emplean moléculas de agua como fuente de potencial reductor, con desprendimiento simultáneo de oxígeno molecular como producto secundario (organismos oxigénicos), las bacterias fotosintéticas operando, en general, en condiciones anaerobias (en medios carentes de oxígeno), utilizan como origen de potencial reductor compuestos azufrados reducidos, hidrógeno y otros, sin que exista, por tanto, liberación de O_2. Finalmente, el potencial reductor y energético así sintetizado sirve para la asimilación reductora tanto del anhídrido carbónico, como del nitrato, sulfato y nitrógeno molecular.

De dos fases, pues, consta el proceso fotosintético: generación de potenciales reductor y energético y asimilación reductora de compuestos oxidados. Ambas tienen lugar de forma independiente en estructuras específicas que, en los vegetales y algas eucariotas, constituyen los cloroplastos. Estos presentan una sorprendente homogeneidad en lo que respecta a estructura, composición, bioquímica y función. Podemos delimitar en ellos tres regiones bien definidas: envoltura, estructura granal y estroma amorfo.

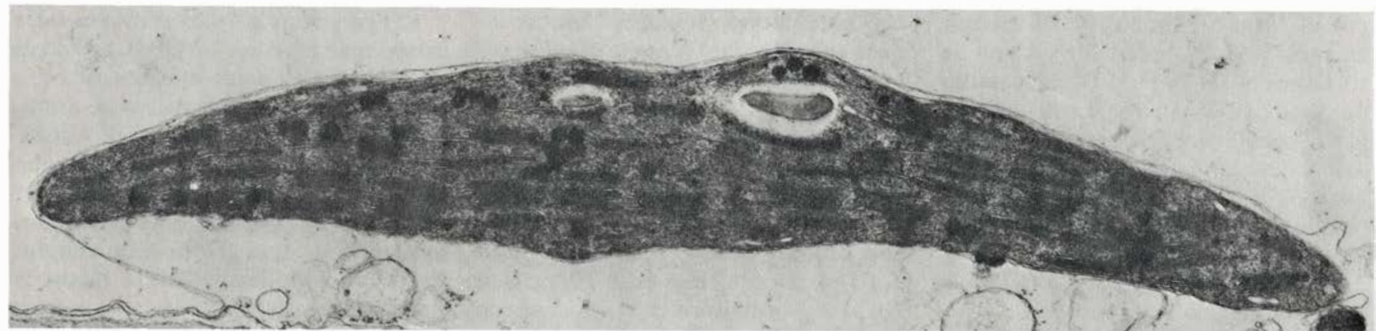
La envoltura del cloroplasto consta de dos membranas separadas por un espacio intermembranal; la externa es inespecíficamente permeable; la cubierta interna constituye, por contra, la auténtica barrera selectiva del cloroplasto. La estructura granal alberga en los tilacoides los pigmentos fotoactivos y restantes componentes de la cadena de transporte electrónico, así como del sistema subsidiario de síntesis de compuestos energéticos. Se denomina estroma el espacio limitado por las envolturas cloroplastídicas, en el que nadan las lamelas granales, que son membranas que sirven de soporte a los componentes indicados. En el estroma se encuentra en solución un equipo enzimático, del que destacaremos las enzimas del ciclo de Calvin, cuyo constituyente principal es la llamada fracción I. Aparece así el cloroplasto compartimentado en dos espacios: el propiamente estromático y un segundo, intracisternal, limitado por las capas lamelares de la grana.

El ciclo reductivo de las pentosas-fosfato, o ciclo de Benson-Calvin, constituye el proceso bioquímico básico por el que el anhídrido carbónico se convierte en azúcares durante la fotosíntesis. Con excepción de algunas bacterias fotosintéticas, dicho proceso se encuentra presente en todos los seres autótrofos; se presenta en el reino vegetal, tanto en organismos eucariotas como en las algas verde-azuladas procariotas. En algunas plantas superiores, las denominadas tipo C_4 y CAM, existe un proceso adicional en las células mesofílicas de la hoja, por el que el anhídrido carbónico se incorpora primero en compuestos con cuatro átomos de carbono, de los que se liberará en las células del parénquima vascular, en cuyos cloroplastos el anhídrido carbónico se reasimila según el ciclo de Calvin. No constituye, pues, una alternativa al mismo, sino un paso previo conducente a aumentar la concentración local de CO_2 en el microambiente de la enzima carboxilante del ciclo, la ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa.

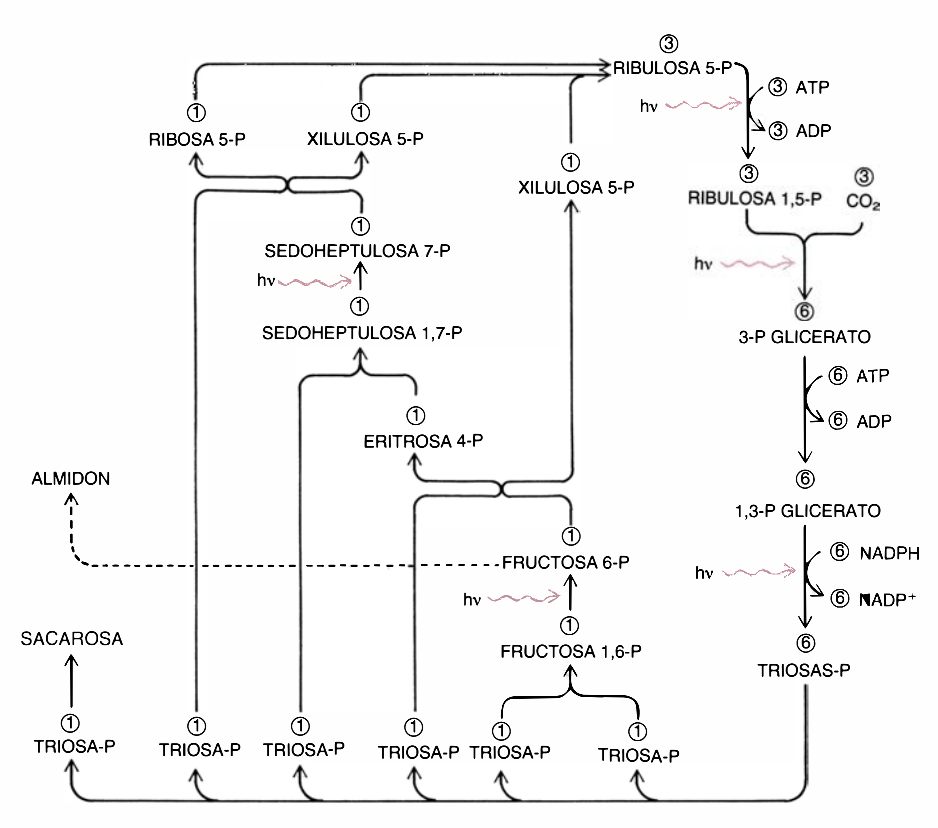
El ciclo de Benson-Calvin tiene lugar en el espacio estromático del cloroplasto; está catalizado por hasta 12 sistemas enzimáticos que se encuentran solubilizados en el estroma. De ellos, sólo dos utilizan el ATP generado en el proceso de fotofosforilación –la fosfoglicerato quinasa y la fosforribuloquinasa–, mientras que uno sólo –la triosafosfato deshidrogenasa– emplea el NADPH originado en dicho proceso. El proceso de fotofosforilación consiste en la síntesis de moléculas energéticas de ATP a expensas de parte de energía, que se libera en las reacciones de óxido-reducción que transportan electrones desde el agua al $NADP^+$.

Puesto que la tasa de fijación de CO_2 por los cloroplastos se aproxima a los 200 micromoles por hora y por cada miligramo de clorofila, y el contenido de ATP y NADPH del orgánulo iluminado es pequeño –unos 40 nanomoles por miligramo de clorofila para el primero y unos 120 micromoles para el segundo–, ya se comprende que el ciclo ha de verse sometido a un control muy preciso. (El nanomol equivale a la milésima parte de un micromol, que a su vez es la millonésima parte de mol, o peso molecular, en gramos, del compuesto en cuestión. Una concentración micromolar es aquella que contiene un micromol por litro.) Al esclarecimiento de dicho control, iniciado por Melvin Calvin en el Lawrence Radiation Laboratory, de la Universidad de Berkeley, han contribuido estudios sobre los niveles de intermediarios en hojas, células y cloroplastos aislados o reconstituidos, como experiencias sobre sistemas enzimáticos aislados.

Analizando el ciclo se observa que, por cada tres moléculas de CO_2 asimi-



1. PILAS TILACOIDALES DE LA GRANA; están dispuestas en el cloroplasto de forma que los pigmentos fotosintéticos se vean sometidos a una irradiación óptima y que las lamelas granales presenten una gran superficie de contacto con la solución estromática. Por estroma se entiende la solución contenida por las envolturas del cloroplasto. El tilacoide designa pequeños sacos lenticulares formados por membranas específicas (lamelas), dispuestos en pilas intercomunicadas (grana). Las envolturas son sendas capas membranales superpuestas que delimitan y envuelven el contenido cloroplastídico. En la microfotografía electrónica, de un cloroplasto del tejido mesofílico de hojas de espinaca, se distinguen granos de almidón y varios glóbulos osmiofílicos.



2. CICLO DE CALVIN. Ofrece varias alternativas estequiométricas, o de ajuste de las reacciones del mismo atendiendo al número de átomos de carbono de los compuestos que intervienen de acuerdo con las necesidades del vegetal. El esquema muestra la situación que se presenta cuando el metabolismo del cloroplasto se orienta hacia la síntesis de sacarosa, vía triosa-*P* exportada al citoplasma ($3C_5 + 3CO_2 \rightarrow 3C_5 + 1C_3$); otra posibilidad es la síntesis de almidón a partir de la fructosa 6-*P* del ciclo ($6C_5 + 6CO_2 \rightarrow 6C_5 + 1C_6$) y una tercera, el aumento de la propia concentración de ribulosa 1,5-*P* del cloroplasto, que tiene lugar en el período de inducción ($5C_5 + 5CO_2 \rightarrow 6C_5$). Tales alternativas implican cambios en los niveles de actividad de algunos sistemas enzimáticos del ciclo, además de gastos distintos de ATP en cada vuelta del mismo (tres moléculas de ATP por molécula de anhídrido carbónico asimilado, en el caso de síntesis de sacarosa o almidón, frente a 3,2 moléculas de ATP en la síntesis de ribulosa 1,5-*P*).

ladas en cada vuelta del mismo, se consumen nueve de ATP y seis de NADPH, con una formación neta de una de triosa-fosfato. Teniendo en cuenta que el cambio de energía libre en la oxidación del NADPH es de −52,6 kilocalorías por mol, y en la hidrólisis del ATP de −7,6 kilocalorías por mol, la cantidad de energía consumida en cada vuelta de ciclo será de −384 kilocalorías. El signo negativo que antecede a las kilocalorías consumidas indica energía liberada en los procesos indicados, es decir, perdida por el sistema. Puesto que la energía acumulada en la síntesis de un mol de triosa-fosfato es de +350,4 kilocalorías por mol, se deduce, tras una sencilla relación, que la energía disipada en cada vuelta del ciclo es sólo de +33,6 kilocalorías, lo que representa un rendimiento aproximado del 91 por ciento. (El signo es ahora positivo porque se trata de energía incorporada en la molécula de triosa-fosfato sintetizada.)

Estos valores están basados en puras concepciones termodinámicas, con cambios de energía libre determinados sobre rendimientos máximos de las reacciones enzimáticas, deducidos de unas concentraciones no limitantes de los sustratos. Cuando dichos valores se calculan en función de las concentraciones fisiológicas de metabolitos del cloroplasto, el rendimiento del ciclo de Calvin baja hasta valores reales próximos al 83 por ciento.

Sin embargo, cuando una hoja o cloroplastos aislados se iluminan tras un período en oscuridad, la tasa inicial de fijación de CO_2 es mucho más baja; no alcanzará un valor máximo y estable hasta transcurridos varios minutos. Este período se llama "fase de inducción". No lo presenta ni el transporte electrónico fotosintético ni la fotofosforilación concomitante, cuando se analizan desacoplados del proceso de fijación de CO_2. Ello hizo pensar que dicho fenómeno se encontraba vinculado al ciclo de asimilación del mismo. Este hecho, puesto ya de manifiesto por Osterhant y Haas en 1918, ha sido analizado posteriormente por Eugene Rabinowitch, del departamento de botánica de la Universidad de Illinois en Urbana, y por David A. Walker, de la Universidad de Sheffield.

Según la explicación vigente, habría una desactivación en la oscuridad de algunas enzimas que intervienen en la asimilación del CO_2; unido ello al cese del aporte de NADPH y ATP, conduce a un defecto del nivel de intermediarios del ciclo de Calvin, fundamentalmente del aceptor primario de CO_2, la ribulosa 1,5-bisfosfato, que baja de unos 130 a 10 nanomoles por miligramo de clorofila. Esto queda confirmado por acortarse la "fase de inducción", y aún anularse, cuando el intervalo de oscuridad disminuye o se hace preceder de un período de iluminación, o cuando se utilizan cloroplastos preparados a partir de hojas irradiadas. Análogamente, la "fase de inducción" se acorta si agregamos al medio intermediarios del ciclo de Calvin que, como el fosfoglicerato o las triosas-fosfato, son permeables a las paredes del cloroplasto, o bien cualquier otro cuando los ensayos se llevan a cabo con cloroplastos reconstituidos. Dicha fase se alargará cuando agreguemos fosfato inorgánico que, por el equilibrio impuesto por el "traslocador de fosfatos", fuerza la salida del cloroplasto de los ésteres fosfóricos intermediarios permeables al mismo.

Bassham y Krause, del laboratorio de biodinámica química de la Universidad de Berkeley, han calculado los cambios de energía libre en situación fisiológica de equilibrio, para cada una de las reacciones del ciclo reductivo de las pentosas-fosfato. Los pasos que se muestran limitantes según este criterio son: la catálisis por la ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa, con un consumo de energía libre próximo a −10 kilocalorías; las reacciones catalizadas por la fructosa 1,6-bisfosfatasa y sedoheptulosa 1,7-bisfosfatasa, con valores de cambio de energía libre de −6,5 y −7,0 kilocalorías, respectivamente; el paso regulado por la fosforribuloquinasa, con un cambio de energía libre de −4,0 kilocalorías, y la reducción del fosfoglicerato a triosas-fosfato, con un cambio de −1,6 kilocalorías.

Si agregamos a lo anterior que tales pasos muestran un nivel de actividad del mismo orden que el necesario para justificar las tasas fisiológicas de asimilación de CO_2 por cloroplastos aislados, y que los sistemas enzimáticos que los catalizan tienen una estructura en subunidades, iguales o diferentes, consecuencia de una codificación reiterada, tendremos justificada la hipótesis que atribuye un papel regulador a estas enzimas sobre el ciclo de Calvin en su conjunto.

En particular, resulta ello evidente para la ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa y fructosa 1,6-bisfosfatasa, quizá

por catalizar aquélla el primer paso del ciclo, en que se produce la propia fijación del CO_2, y la segunda por ser punto esencial del mismo, actuando en un lugar en que el metabolismo del cloroplasto puede desviarse hacia la síntesis de azúcares, o de grasas y proteínas.

Los textos de bioquímica vegetal dividen las etapas de la fotosíntesis en fase lumínica y fase oscura. De acuerdo con la misma, en la oscura se registra, mediante una serie de reacciones independientes de la luz, el proceso de asimilación del anhídrido carbónico a expensas del NADPH y ATP originados en la fase lumínica anterior. Los datos acopiados a lo largo de los últimos quince años muestran, sin embargo, que el ciclo reductivo de las pentosas-fosfato requiere luz para la activación de una serie de enzimas del mismo. Se ha demostrado una activación paralela para otras enzimas relacionadas con distintos procesos metabólicos de la planta: reducción de ácidos dicarboxílicos, asimilación de sulfatos, ciclo oxidativo de las pentosas-fosfato y otros.

La primera prueba de la existencia de tal fenómeno de fotoactivación vino de la observación según la cual la actividad $NADP^+$–gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa de espinaca se incrementaba varias veces cuando se sometían las hojas a una iluminación previa. Aunque al principio se achacó el hecho a una síntesis de novo de la enzima, inducida por el NADPH y ATP generados al iluminar, determinados ensayos con inhibidores de la síntesis proteica mostraron que éste no era el caso. Abonaron la hipótesis de la existencia de la fotoactivación cambios en los niveles de ciertos intermediarios subsiguientes a la transición luz-oscuridad, observados en células de *Chlorella*.

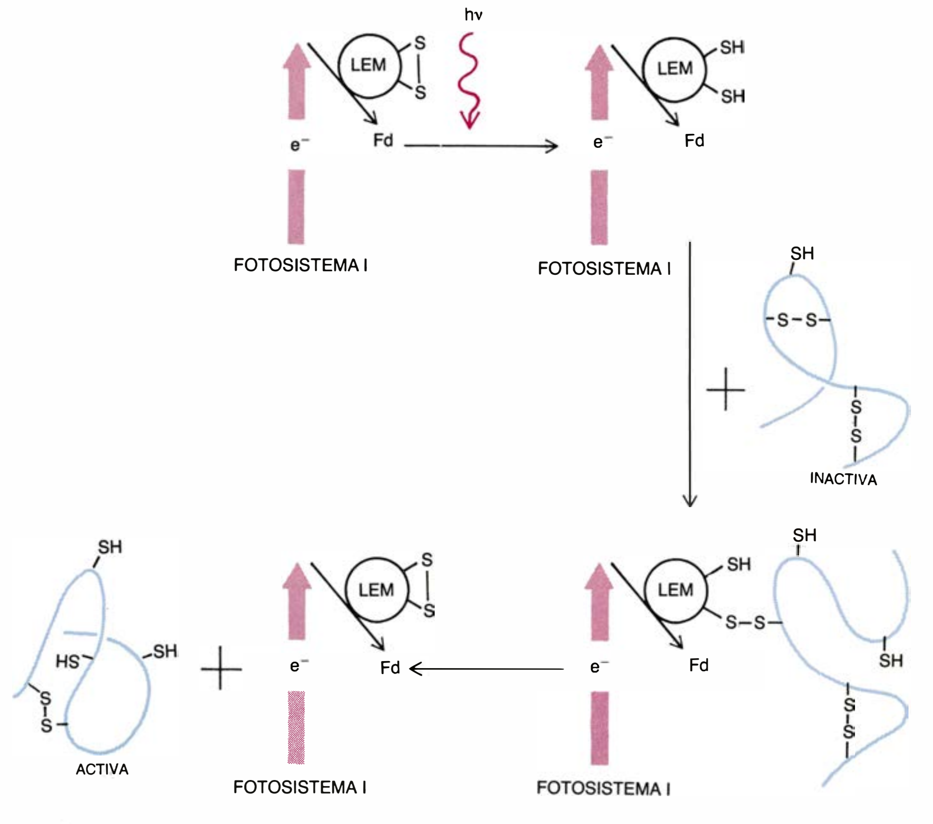
Experimentos similares efectuados con cloroplastos aislados han resultado en análogas conclusiones. Utilizando cloroplastos de espinaca o guisante, se ha puesto de manifiesto la existencia de una fotoactivación de distintas enzimas, de nombre un tanto largo: $NADP^+$-gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa, sedoheptulosa 1,7-bisfosfatasa, fosforribuloquinasa, malato deshidrogenasa y fosfoglucomutasa; las dos últimas no vinculadas al ciclo de Calvin. Así quedó completo el cuadro de la fotoactivación como elemento regulador de las enzimas juzgadas como controladoras de la dinámica del ciclo de Calvin. Resta el caso de la ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa que, si bien es activada por iluminación anterior de cloroplastos aislados, el incremento de actividad es tan pobre que su significación fisiológica queda en duda.

Sin embargo, los estudios más precisos sobre la activación por la luz han sido efectuados con sistemas enzimáticos aislados. De ellos se ha concluido que, derivados de la iluminación, existen varios factores que, aislada o concurrentemente, inciden en el fenómeno de fotoactivación: *p*H, concentraciones de iones magnesio, ATP y NADPH y reducción a través de entidades proteicas. Estudios efectuados con cloroplastos aislados pusieron ya de manifiesto que el aumento de *p*H que tiene lugar en el espacio estromático –aproximadamente entre 7,0 y 8,0– en la transición oscuridad-luz inducía la activación de algunas enzimas del ciclo de Calvin. Nuevos ensayos *in vitro* con enzimas aisladas demostraron la exigencia de ciertos niveles de *p*H, con una brusca activación en la zona alcalina, de la fructosa 1,6-bisfosfatasa, sedoheptulosa 1,7-bisfosfatasa y fosforribuloquinasa.

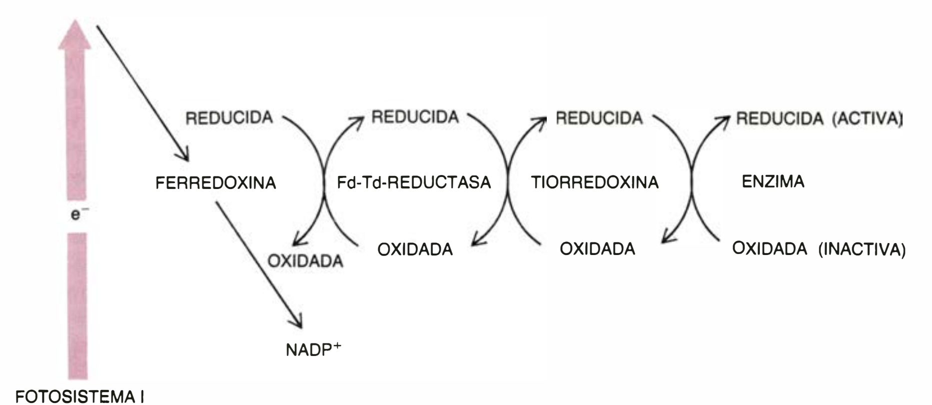
Por otro lado, en virtud de la iluminación se eleva la concentración de iones magnesio en el estroma –aproximadamente entre 1 y 4 milimolar– por un flujo compensador de iones hacia el espacio estromático que contrarresta en cierta medida el flujo de protones que cursa en sentido inverso. Aunque la influencia del Mg^{2+} en la activación del ciclo de Calvin ha sido objeto de amplia controversia, hoy puede concluirse que tal gradiente de concentración es imprescindible para la actividad de la fructosa 1,6-bisfosfatasa. De la activación del Mg^{2+} dependen también otras enzimas: ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa, sedoheptulosa 1,7-bisfosfatasa y fosforribuloquinasa.

Una activación de enzimas del ciclo de Calvin por ATP y NADPH podría ser lógica, en principio, ante el aumento de concentración de los mismos en el estroma a consecuencia de la iluminación. En efecto, tanto el NADPH como el ATP inducen la disociación de la enzima gliceraldehído 3-fosfato-deshidrogenasa en la llamada forma reguladora, fuertemente activa. Por otro lado, un incremento en el valor de la carga energética, o razón de ATP a ADP, parece constituir un factor clave en la regulación de la fosforribuloquinasa.

A lo largo de los últimos 10 años ha ido demostrándose cómo varias enzimas del ciclo de Calvin experimentan, bajo iluminación, una activación por



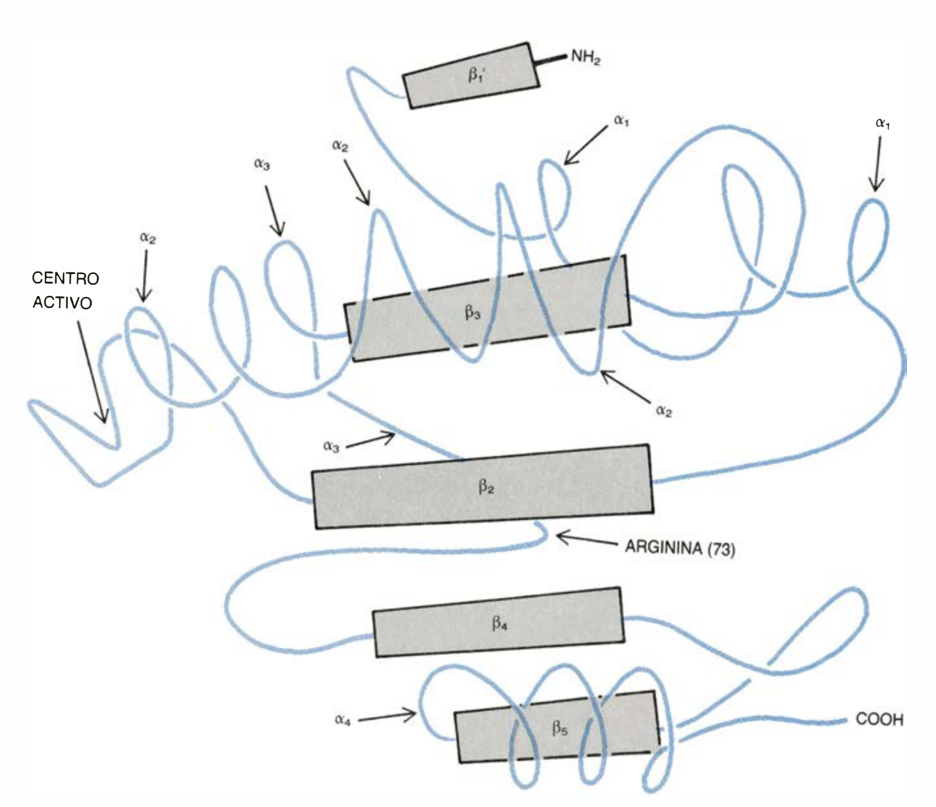
3. EL MECANISMO DE FOTOACTIVACION POR LOS LEM exige un anclaje, al menos temporal, de la enzima a las lamelas de la grana. Son éstas las membranas que constituyen el tilacoide; encierran el sistema pigmentario y elementos transportadores de la maquinaria fotosintética. Y llamamos LEM a compuestos ditiólicos (S-S) ligados a las lamelas. Mientras dura el anclaje se desarrolla el proceso de reducción y el cambio tiol-disulfuro, procesos ambos que alteran la conformación de la enzima.



4. FOTOACTIVACION POR EL SISTEMA FERREDOXINA-TIORREDOXINA. No implica una asociación de la enzima a las lamelas tilacoidales, por cuanto todos los componentes del sistema activante –ferredoxina, reductasa y tiorredoxina– pueden tener su propia existencia solubilizados en el estroma.

reducción de grupos azufre (los -S-S-) de la proteína enzimática, activación que median entidades proteicas; de esa forma, sirven de puente de enlace entre el poder reductor generado en las etapas fotoquímicas de la fotosíntesis y los propios sistemas enzimáticos a activar. Se han propuesto dos sistemas proteicos fotoactivantes que, si bien coinciden en muchos aspectos, se contraponen en otros.

Louise Anderson, de la Universidad de Chicago, ha postulado que la activación lumínica de algunas enzimas del ciclo de Calvin tiene lugar a través de componentes ditiólicos (S-S) ligados a las membranas tilacoidales, a los que denomina factores LEM (de "light effector mediators"). En situación de oscuridad permanecen en forma disulfuro oxidasa, mientras que bajo iluminación son reducidos a través de la cadena de transporte electrónico, concretamente en el lado reductor del fotosistema I, interaccionando en tal estado con la enzima a activar.



5. ESTRUCTURA TERCIARIA DE LA TIORREDOXINA de *Escherichia coli*. La estructura terciaria de una proteína es la forma final que adoptan las cadenas polipeptídicas de la misma en razón de enlaces intracatenarios (puentes disulfuro o de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas, etcétera). En nuestro caso, delimita dos partes distintas de la molécula: una que engloba las hélices α_1-α_2-α_3 y las láminas β_1-β_2-β_3, y una segunda que contiene la hélice α_4 y las láminas β_4-β_5. El punto de entronque de ambos fragmentos lo constituye el resto del aminoácido arginina en posición 73, lugar por donde se rompe la molécula nativa por digestión selectiva con tripsina. Ambos fragmentos se reasocian a través de los puentes de hidrógeno entre las láminas β_2 y β_4, formando un complejo funcional frente a la ribonucleótido-reductasa y tiorredoxina-reductasa. En bioquímica se llama funcional a la molécula, complejo o metabolito, in vitro o in vivo, que resulta operativo en el desempeño de una función estructural o metabólica.

Aunque no se descarta la posibilidad de que exista un factor LEM por cada enzima fotoactivable, hasta ahora se han descrito sólo dos, diferenciables por el punto de la cadena de transporte en que tiene lugar su reducción y por los sistemas enzimáticos a que activan. El LEM_I acepta electrones del fotosistema I antes que la ferredoxina, y es capaz de activar a distintas enzimas: $NADP^+$-gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa, fosforribuloquinasa y $NADP^+$-malato deshidrogenasa. Por su parte, el LEM_{II}, reducido por la ferredoxina, se muestra activo frente a la fructosa 1,6-bisfosfatasa. Diversos hechos parecen indicar que las enzimas LEM-modulables presentan, además de agrupaciones disulfuro, al menos un grupo tiólico libre. Esto, junto con el carácter ditiólico de los LEM, indica que habría un proceso de reducción en la activación enzimática y otro proceso simultáneo de cambio tiol-disulfuro.

Por otro lado, y de forma independiente, Bob Buchanan, del departamento de fisiología celular de la Universidad de Berkeley, observó la necesidad de un denominado factor proteico para activar la fructosa 1,6-bisfosfatasa cloroplastídica por ferredoxina fotoquímicamente reducida. Posteriormente, se desdobló el factor proteico en dos entidades proteicas diferenciadas: una de alto peso molecular, denominada ARP*a* ("assimilation regulatory protein"), y otra, ARP*b*, de peso molecular inferior; ambas se precisan para activar la fructosa 1,6-bisfosfatasa por ferredoxina reducida. Se descubrió más tarde que la primera era una nueva enzima cloroplastídica, la ferredoxín-tiorredoxín-reductasa; la segunda resultó ser una tiorredoxina.

Las tiorredoxinas constituyen unos transportadores de hidrógeno de naturaleza polipeptídica, con un peso molecular entre 12.000 y 20.000, según origen, que se aislaron, con distinto nombre, en estudios sobre el sistema reductor del sulfato y sulfóxido en levaduras. Su denominación –que alude a su carácter redox vinculado a la presencia de grupos tiólicos– se debe a Peter Reichard, del departamento de química del Instituto Karolinska de Estocolmo, quien puso de manifiesto su papel en la síntesis de ADN a través de la reducción de los grupos ribonucleotídicos a sus correspondientes derivados desoxirribonucleotídicos.

Las tiorredoxinas se encuentran también implicadas en otros procesos del metabolismo bacteriano y animal, así como del aparato no fotosintético del vegetal. En estas reacciones la forma

reducida de tiorredoxina se origina merced a una $NADP^+$-tiorredoxín reductasa, en la que el NADPH actúa de fuente de poder reductor. Por el contrario, en la activación de las enzimas cloroplastídicas la tiorredoxina se reduce por la ferredoxina en un proceso catalizado por la enzima ferredoxín-tiorredoxín-reductasa, con un *p*H óptimo de actuación alrededor de 8,0, es decir, en las condiciones del cloroplasto iluminado. Bajo este planteamiento la ferredoxina, fotoquímicamente reducida a través del transporte de electrones que se produce, reduce a la tiorredoxina, que a su vez ejerce la activación reductora de las enzimas fotoactivables.

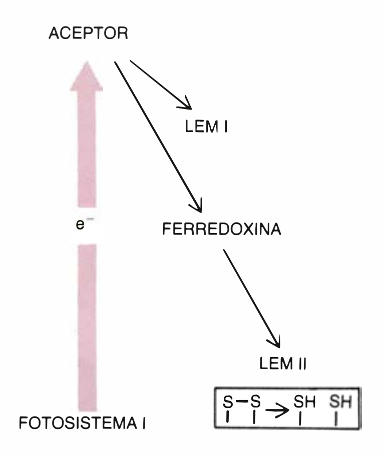
En este esquema, y por supuesto en condiciones no fisiológicas, la ferredoxina reducida puede reemplazarse por ditiotreitol (pero no por monotioles, tipo cisteína, mercaptoetanol, glutatión reducido, etcétera), que reduce no enzimáticamente a la tiorredoxina con total efectividad. La tiorredoxina puede contemplarse así como un regulador mensajero entre la luz y los procesos que utilizan los productos por ella generados, ATP y NADPH; su papel consiste en alertar a las enzimas clave de que se inicia un período de iluminación y de que la actividad biosintética va a comenzar.

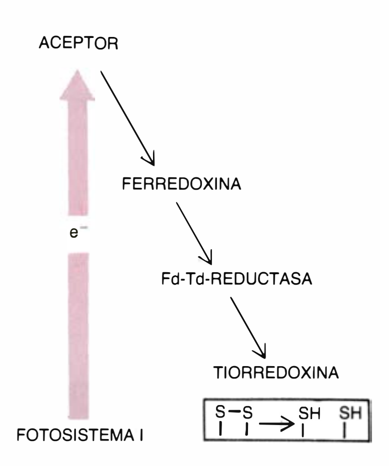
En espinaca y cebada se han purificado las denominadas tiorredoxinas *f* y *m*, de ubicación cloroplastídica. Una tiorredoxina *c*, aislada antes del citoplasma de hojas de espinaca, se ha desdoblado en las tiorredoxinas c_f y c_m, en cebada y espinaca. La tiorredoxina *f* activa preferentemente a las enzimas fructosa 1,6-bisfosfatasa, fosforribuloquinasa y $NADP^+$-gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa; la tiorredoxina *m*, por el contrario, sólo es eficaz en la activación de la $NADP^+$-malato deshidrogenasa. La significación fisiológica y mecanismo de reducción de las tiorredoxinas *c* foliares no se conoce, aunque presumiblemente, al igual que ocurre con las tiorredoxinas de semillas, pueden estar involucradas en la síntesis de desoxirribonucleótidos.

A pesar de esta diversidad, todas las tiorredoxinas parecen mostrar sorprendentes analogías, lo que explica la existencia de frecuentes reacciones cruzadas entre ellas, constituyendo según Arne Holmgren, del departamento de química fisiológica del Instituto Karolinska, miembros de una superfamilia de proteínas: tiol-proteínas donadoras de hidrógeno. Así, las tiorredoxinas de *Escherichia coli* y *Corynebacterium nephridii* poseen una similitud secuencial en casi la mitad de los restos de aminoácidos, analogía que se extiende al centro activo y otras regiones fundamentales de la molécula. Más aún, ambas tiorredoxinas exhiben estructuras tridimensionales muy similares, derivadas de la compleja estructura secundaria de estos compuestos: 4 hélices α y 5 cadenas dispuestas en lámina plegada en β. (La estructura secundaria de una proteína en hélice α indica un enrollamiento helicoidal de la cadena polipeptídica de la misma, mientras que la lámina plegada en β significa una disposición en zigzag de las cadenas que, al unirse entre sí paralelamente, adoptan la forma de una lámina plegada.) Los puentes de hidrógeno que se establecen entre las láminas β_2 y β_4 resultan determinantes para mantener la estructura tridimensional de la molécula.

En cualquier caso, todas las tiorredoxinas hasta ahora estudiadas exhiben el mismo centro activo, que forma un resalte que sobresale del conjunto de la estructura, en contra de lo habitual en las proteínas enzimáticas, cuyo centro activo reside en el interior de la molécula, rodeado de un entorno hidrofóbico.

Un cotejo entre los esquemas LEM y ferredoxina-tiorredoxina nos revela similitudes y diferencias. En ambos, el poder reductor procede de la cadena de transporte electrónico antes de que se produzca la reducción del $NADP^+$ y, en ambos también, grupos sulfhidrilos aparecen involucrados en el mecanismo de óxido-reducción. Por el contrario, el sistema ferredoxina-tiorredoxina necesita otros componentes solubles amén de la ferredoxina-tiorredoxina y ferredoxín-tiorredoxín-reductasa, cosa que no ocurre con el sistema LEM; quizás el LEM_{II} podría ser, en cierto modo, asimilable al esquema ferredoxina-tiorredoxina, por cuanto en ambos el punto de arranque de la cadena de transporte tiene lugar en la ferredoxina. Sea cual fuere el sistema operante, una particularidad común a las enzimas fotoactivables es que la velocidad de activación es mucho más lenta que la propia actividad catalítica, por lo que a menos que se efectúe una preincubación con los efectores se observará siempre un período inductivo, esto es, un período de histéresis.

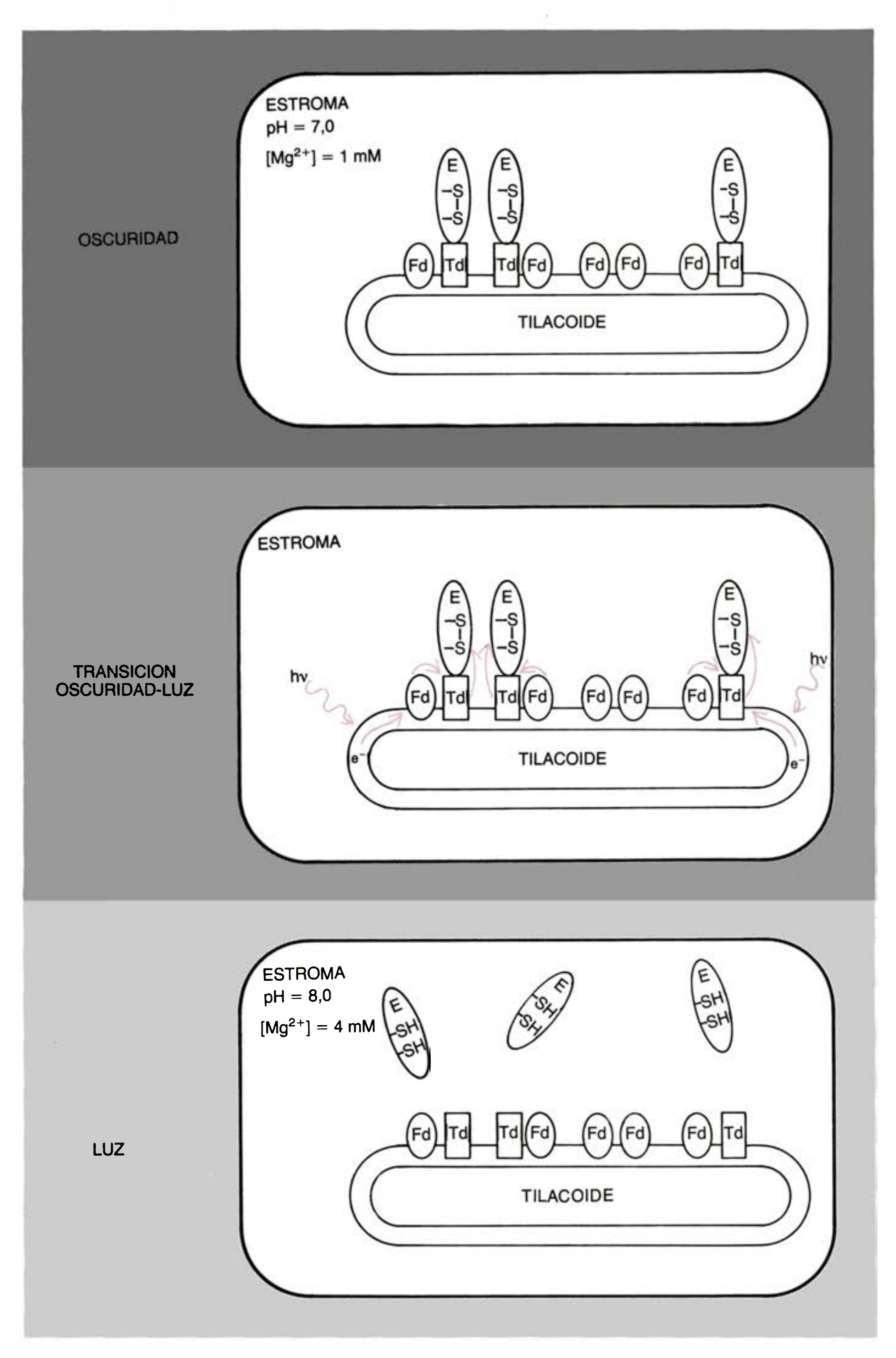




6. COMPARACION entre el sistema LEM y el sistema ferredoxina-tiorredoxina. La activación de la enzima fructosa 1,6-bifosfatasa fotosintética por los sistemas LEM_{II} y el ferredoxina-tiorredoxina presenta muchos puntos de coincidencia. Quizás el principal motivo de conflictividad radique en no haberse detectado todavía actividad ferredoxín-tiorredoxín-reductasa que se halle ligada a las lamelas tilacoidales.

A la vista de lo expuesto cabe preguntarse, ¿por qué tal acúmulo de mecanismos en la regulación de la asimilación del CO_2 en la transición día-noche? ¿Resulta verdaderamente necesaria la compleja activación reductora de algunas enzimas del ciclo de Calvin, existiendo ya una modulación enzimática por *p*H, iones magnesio y concentraciones de NADPH y ATP? No hay que perder de vista que en el cloroplasto se desarrolla la asimilación reductora del CO_2 y otros procesos relacionados con el metabolismo hidrocarbonado: síntesis de almidón, ciclo oxidativo de las pentosas-fosfato, actividad glucolítica, exportación activa de asimilados al citoplasma; algunos de esos procesos, de signo catabólico o degradativo, con producción también de NADPH y ATP, han de ser funcionales sólo en situaciones en que no pueda ocurrir la actividad fotosintética. De ello se deduce que la concentración de NADPH y ATP no podrá ser, aisladamente, un elemento regulador.

En realidad, el factor fundamental para la regulación lumínica procede de



7. PARTE DE LA DOTACION DE TIORREDOXINA DEL CLOROPLASTO, como de su contenido en fructosa 1,6-bifosfatasa, podrían encontrarse asociados a las membranas lamelares en la oscuridad. Esta estructuración permite una rápida activación de la enzima en la transición oscuridad-luz, por transferencia de equivalentes de reducción suministrados, vía ferredoxina, por el transporte electrónico fotosintético. Finalmente, el aumento del *p*H y concentración estromática de iones magnesio subsiguientes a la iluminación liberará la enzima activada, lista ya para intervenir, en el seno de la solución estromática.

la falta de compartimentación de una serie de procesos totalmente opuestos; téngase en cuenta que entre el ciclo de Calvin, por un lado, y el ciclo oxidativo de las pentosas-fosfato y actividad glucolítica, por otro, se repiten casi todas las reacciones enzimáticas en uno y otro sentido.

En conclusión, pues, y a reserva del futuro esclarecimiento de la realidad fisiológica de los sistemas ferredoxina-tiorredoxina o LEM, los datos disponibles en la actualidad permiten establecer una estrecha relación entre el *p*H, concentración de Mg^{2+} y fotoreducción de la enzima, en el aumento de la actividad de ciertas enzimas estromáticas que tiene lugar en la transición oscuridad-luz. La reducción por la luz de grupos disulfuro de la enzima introduce en el mismo cambios conformacionales tales, que lo hacen óptimamente operativo al *p*H 8,0 y concentración de Mg^{2+} 3 milimolar que se dan en el estroma del cloroplasto iluminado, haciéndose así aditivos los efectos activantes de cada uno de estos factores.

De acuerdo con el mecanismo de activación lumínica por el sistema ferredoxina-tiorredoxina, parece plausible la existencia de algún tipo de interacción entre los elementos integrantes de la cadena de activación: ferredoxina-reductasa-tiorredoxina-enzima.

Investigaciones efectuadas en el departamento de bioquímica vegetal de la Estación Experimental del Zaidín, de Granada, por los autores, han demostrado la existencia *in vitro* de una fuerte afinidad entre el par tiorredoxina-fructosa 1,6-bisfofatasa en las condiciones de *p*H y concentración de iones magnesio existentes en el interior del cloroplasto en la oscuridad.

Dicha afinidad se debe a interacciones hidrofóbicas entre ambas moléculas y desaparece con la luz. Más aún, esa enzima la retienen igualmente lamelas tilacoidales de cloroplastos de espinaca; se ha estimado que aproximadamente el 12 por ciento de la enzima fructosa 1,6-bisfosfatasa del cloroplasto se encuentra ligada a las lamelas en la oscuridad. Tales resultados confirman la presencia de entidades del tipo tiorredoxina vinculadas a las membranas tilacoides, así como la existencia de cierto porcentaje de las enzimas fotoactivables del cloroplasto ligadas a las lamelas del mismo bajo oscuridad. Paralelamente, señalan la posible existencia de una especie de complejo multienzimático de tales enzimas con los componentes del sistema fotoactivante, por lo menos en el momento de actuación.

Las ventajas fisiológicas que se derivan de esta afinidad tiorredoxina-enzima son evidentes. Si parte de la dotación estromática de tales enzimas puede permanecer ligada a las lamelas tilacoidales en condiciones de oscuridad, a través de la tiorredoxina vinculada a las membranas granales, la activación de la enzima al iluminar podrá tener lugar de forma más eficiente, vía flujo electrónico emanado de las propias membranas, sin solución alguna de continuidad. El subsiguiente aumento del *p*H estromático y de la concentración de Mg^{2+} del mismo, derivados del flujo electrónico anterior, liberará la enzima fotoactivada en el espacio estromático, lista para actuar; dicha liberación será también rápida, ya que el cambio en la concentración de hidrogeniones y Mg^{2+} se detectará en el microambiente que rodea a la estructura tilacoidal antes que en el espacio estromático.

Colapso y formación de estrellas

Oculto a la observación, este proceso puede simularse con ordenadores de alta velocidad. Las imágenes que se obtienen nos ayudan a entender la formación de nuestro sistema solar

Alan P. Boss

¿Cuáles son las primeras fases de la formación de una estrella? ¿Qué determina si una nube de materia susceptible de convertirse en estrella se transformará en una, dos o varias de ellas? Las nubes de gas, polvo y residuos ocultan, en gran parte, todas las fases del nacimiento estelar, salvo la inicial y la final; lo que significa que, hasta ahora, esas preguntas quedan sin una respuesta basada en observaciones directas. Los modelos teóricos ofrecen un camino para orillar este obstáculo, aunque no sea fácil. Cada modelo exige, por sí solo, realizar más cálculos básicos que cuantos se habían acometido por la humanidad entera antes de 1940. Hoy, procesados en complicados ordenadores, tales modelos revelan las diversas fases que atraviesa una estrella en su evolución. Dan también un esquema provisional de cómo nació nuestro sistema solar.

Las estrellas se forman cuando las nebulosas (nubes interestelares de gas y polvo) o partes suyas entran en colapso. Aunque esas nubes resultan demasiado densas para ser atravesadas por los telescopios ópticos, otras más difusas sí son transparentes a la radiación de longitudes de onda milimétricas. Por tanto, podemos recurrir al telescopio sensible a la radiación milimétrica para observar nebulosas en que estén a punto de formarse estrellas. Las nubes, parcialmente transparentes a la radiación infrarroja, posibilitan la observación en el infrarrojo de estrellas recién nacidas dentro de las nebulosas progenitoras. Estas observaciones suministran los datos básicos con los que debe contar cualquier teoría de la formación estelar: las condiciones iniciales de la creación de una estrella y las características de la recién constituida. Por desgracia, hay todavía una diferencia de un factor de 10^{20} entre la densidad de una nube apta para formar estrellas y la de las jóvenes que se observan mediante la radiación infrarroja. Hasta la fecha, ha sido imposible contemplar la nube en su proceso de condensación a través de este dominio de densidades. Nos está vedado, pues, observar cómo se va formando una estrella.

Desde finales de los años sesenta, los astrofísicos han desarrollado modelos de ordenador cada vez más complicados para describir los sucesos que tienen lugar entre las dos fases observables de la formación estelar. Tales modelos se basan en sistemas de ecuaciones que describen el comportamiento del gas y polvo nebulares bajo la influencia de muchas fuerzas diferentes: la solución de esas ecuaciones exige, en números redondos, un millón de operaciones básicas. Incluso con un ordenador de alta velocidad los cálculos de un modelo dado pueden requerir varios meses.

Entre los avances más importantes se encuentra el uso de descripciones de la nube originaria cada vez más ajustadas a la realidad. Los modelos primitivos la concebían como una nube dotada de simetría esférica y sin rotación; en la siguiente etapa de complejidad, se supuso que la nube giraba, aunque manteníase simétrica alrededor de su eje de rotación. En los modelos más recientes, la nube original gira y es completamente asimétrica.

Estos modelos han mostrado que una nube que se condensa pasa, generalmente, por dos fases de rápida contracción (llamadas colapso dinámico); otras fases, durante las cuales la materia exterior se acumula en torno a un núcleo estable, siguen a cada fase de colapso dinámico. En una u otra fase del colapso dinámico, la nube puede fragmentarse en dos o más protoestrellas; que la nube se fragmente o no dependerá del tamaño y velocidad de rotación, entre otras variables. Podría también colapsar produciendo una protoestrella única.

La verdad es que protoestrellas únicas no suelen darse. Pese al despliegue que nos ofrece un cielo nocturno observado a simple vista, la mayoría de las estrellas son binarias. Un sistema binario consta de dos estrellas en órbita una alrededor de la otra. Con frecuencia, los miembros de los sistemas binarios,

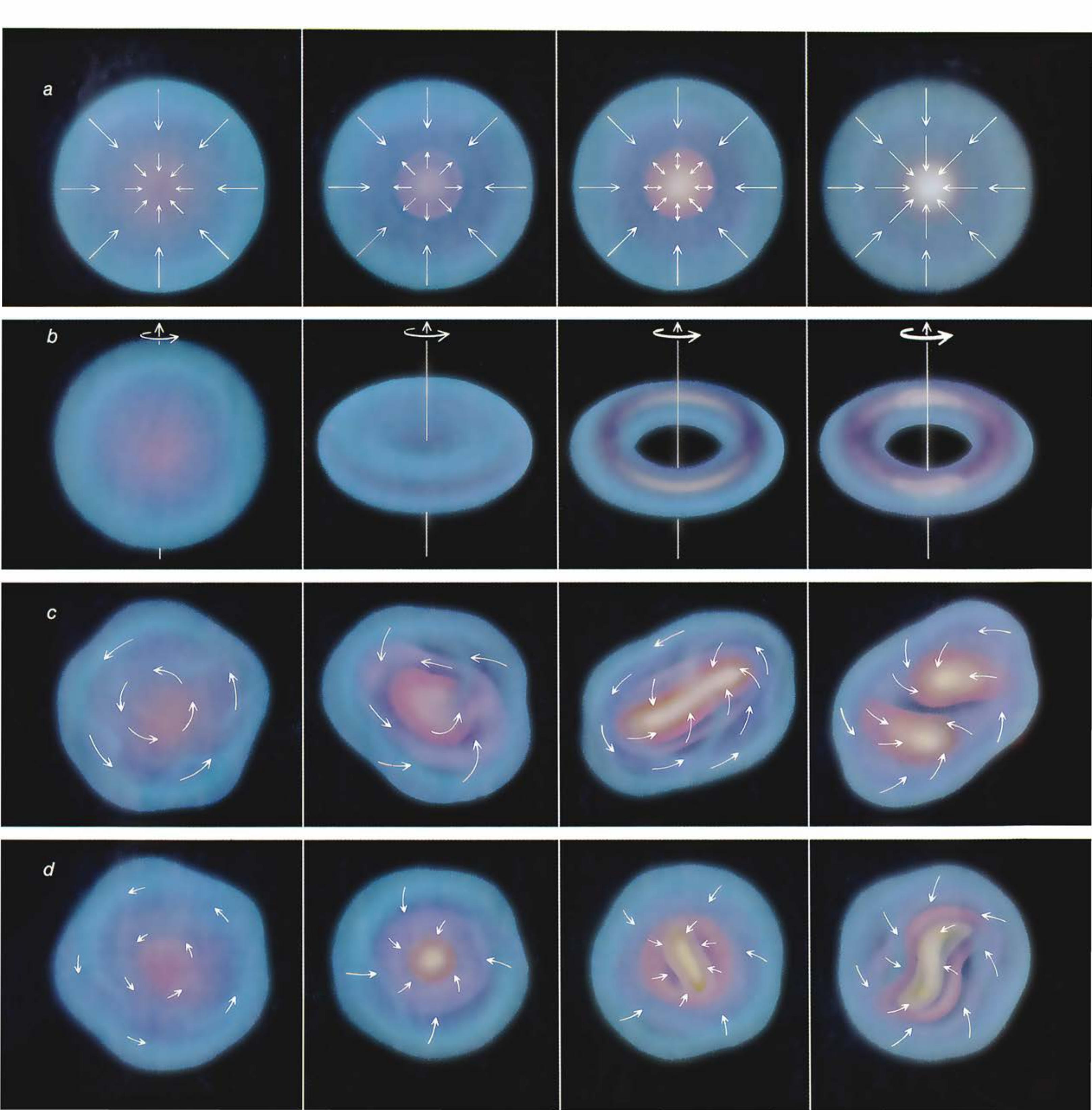
1. MODELOS DE FORMACION DE ESTRELLAS, cuya exactitud y detalle crece a medida que los astrofísicos usan hipótesis cada vez más realistas acerca de las nubes de polvo que originaron las estrellas. Según el primer modelo (*a*), la nube sería una esfera perfecta que no gira. El primer cuadro muestra la fase de colapso dinámico, en la que el gas y el polvo caen rápidamente hacia el centro de la nube. Cuando el centro se hace tan denso que resulta opaco a la radiación infrarroja (*segundo cuadro*), la energía de compresión producida por el colapso no puede radiar desde la nube. Antes bien, incrementa la energía térmica, aumentando la presión del gas y deteniendo el colapso dinámico: se forma el primer núcleo. Con el tiempo (*tercer cuadro*), el primer núcleo adquiere una temperatura suficiente para que las moléculas de hidrógeno se rompan en átomos. Al hacerlo, el hidrógeno absorbe calor; baja así la temperatura del núcleo. La presión dentro del núcleo desciende drásticamente hasta que deja de contrarrestar la fuerza de la gravedad; se produce, entonces, un segundo colapso dinámico. Una vez se ha disociado todo el hidrógeno (*cuarto cuadro*), el segundo colapso se detiene y se forma el núcleo definitivo. En un modelo más complicado (*b*), una nube simétrica respecto a su eje está girando. La materia situada a lo largo del eje se contrae antes que la materia alejada del mismo (la cual experimenta una "fuerza centrífuga" aparente); en razón de lo cual la nube se convierte en una tableta (*segundo cuadro*) y, con el tiempo, se transforma en anillo (*tercer cuadro*). Si la nube en rotación es irregular, por más que lo sea ligeramente, el anillo se rompe en dos o más fragmentos (*cuarto cuadro*). En *c*, una nube completamente asimétrica y en rotación se aplasta (*segundo cuadro*). La nube se deforma cada vez más alrededor de su eje de rotación, hasta adquirir forma de barra (*tercer cuadro*). La barra aumenta su densidad y se alarga conforme la nube va contrayéndose, para romperse luego y crear un sistema binario de protoestrellas (*cuarto cuadro*). Si una nube asimétrica gira muy despacio (*d*), puede condensarse y engendrar una sola protoestrella. El colapso (*cuadros primero, segundo y tercero*) es semejante al mostrado en *c*, pero en *d* la nube no se alarga tanto; de ahí que no se fragmente, sino que se forma una protoestrella única. El centro girará más deprisa que las regiones periféricas, lo que provoca que la barra se arrolle en espiral; la región central puede ceder momento cinético a las regiones externas más lentas, a medida que se contrae para formar una estrella.

demasiado próximos entre sí, se resisten a la distinción, salvo que contemos con grandes telescopios o equipos espectroscópicos. Nuestro Sol, estrella única, forma parte de una población minoritaria. Las nubes que no se fragmentan revisten, pues, un interés particular: pueden representar modelos de la formación de nuestro propio sistema solar.

La fragmentación de una nube es una de las dos características fundamentales de la evolución estelar que una teoría debe ser capaz de describir. Las nubes interestelares alcanzan masas de hasta 100.000 veces la solar: una masa muy grande comparada con la de las estrellas que, rara vez, decuplican la solar. Además, la mayor parte de las estrellas en el disco de nuestra galaxia parecen formarse en cúmulos, que contienen unas cien estrellas. Esas dos observaciones sugieren que las nubes interestelares se fragmentan en muchas protoestrellas.

La segunda característica fundamental que debe describirse se refiere al momento cinético. Dicho toscamente, el momento cinético de un cuerpo en rotación mide cuánta masa del cuerpo está girando, cuán veloz es la rotación de tal masa y cuán grande es el cuerpo. Según las indicaciones experimentales, las nubes interestelares tienen un momento cinético por unidad de masa de hasta 10^5 veces el de su descendencia estelar. Cualquier teoría de la formación de estrellas debe, por tanto, describir cómo se libra la nube de una considerable cantidad de momento cinético antes de colapsar para constituir una o varias estrellas.

Uno de los primeros modelos complejos de ordenador para la formación



de estrellas fue elaborado, en 1968, por Richard B. Larson, de la Universidad de Yale. Desarrolló un modelo detallado de la contracción de una nube con simetría esférica y sin rotación. Llegó a un importante resultado: la descripción de la fase de colapso dinámico. Por tal fase se entiende un período de rápida contracción que se puede explicar mediante la interacción entre dos fuerzas importantes: la gravedad, que tiende a contraer la nube, y la presión térmica, que es la tendencia a dilatarse del gas caliente interior a la nube. Larson mostró que la fase de colapso dinámico se debe, en parte, a la manera cómo la relación entre esas dos fuerzas cambia en virtud del flujo de radiación dentro de la nube.

La capa externa de una nube de polvo muy difusa, transparente a la radiación ultravioleta de las estrellas vecinas, tiende a calentarse substancialmente con dicha radiación. En cuanto la gravedad comprime la nube hasta darle la densidad de una nube oscura, ésta se torna opaca a la luz ultravioleta, eliminando esta fuente de calentamiento. Pero sigue manteniéndose todavía transparente a la radiación infrarroja; así, los granos de polvo de su interior logran radiar energía térmica fuera de la nube, en la porción infrarroja del espectro.

Y a medida que la densidad de la nube aumenta, su temperatura disminuye hasta un mínimo de unos 10 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). La nube entra entonces en una "fase isoterma", durante la cual la temperatura permanece a 10 grados, mientras la nube se contrae, pasando por un amplio dominio de densidades, desde los 10^5 hasta 10^{11} átomos por centímetro cúbico. Conforme la nube empequeñece y se hace más densa, la fuerza gravitatoria adquiere mayor intensidad y, con el tiempo, supera la presión térmica. Resulta de ello un colapso dinámico, en que gas y polvo caen hacia el centro a velocidades rápidamente crecientes. Y a medida que el gas y el polvo caen hacia el centro, aumenta allí la densidad de la nube.

Cuando las regiones centrales de la nube alcanzan un valor de la densidad tal que las convierte en opacas a la radiación infrarroja, termina la fase de



2. ESTRELLAS JOVENES que se han estado formando en el cúmulo NGC 2264 a lo largo de unos veinte millones de años. Las estrellas más brillantes de este cúmulo se distribuyen en la secuencia principal de la evolución estelar; las menos luminosas se encuentran en fase de contracción para alcanzar las densidades y temperaturas más altas, necesarias para el comienzo de las reacciones termonucleares. Esta fotografía óptica fue obtenida por David F. Malin.

colapso dinámico. El colapso de la nube ha generado una gran cantidad de calor debido al trabajo de compresión realizado sobre el gas por las fuerzas gravitatorias. Durante la fase isoterma, este calor se radiaba fuera de la nube en forma de radiación infrarroja; una vez que la radiación no puede escapar fácilmente de la nube, la temperatura y la presión comienzan a aumentar. Cuando el centro de la nube sube hasta los 100 grados Kelvin de temperatura y alcanza una densidad de unos 10^{14} átomos por centímetro cúbico, la presión térmica ejerce una fuerza superior a la gravitatoria y detiene el colapso dinámico de la nube. La región donde se detiene el colapso dinámico tiene un radio de unas cinco unidades astronómicas (una unidad astronómica, unos 150 millones de kilómetros, aproximadamente, es la distancia media de la Tierra al Sol). Esta región se llama primer núcleo; la materia de las regiones más externas, todavía transparente a la radiación infrarroja, continúa cayendo hacia dentro, acumulándose en el núcleo.

El primer núcleo se halla en un estado de cuasi-equilibrio: la materia situada hacia la parte más interna del núcleo fluye alternativamente hacia dentro y hacia fuera, produciendo un aumento y disminución periódicos de la densidad.

A medida que la materia de la parte exterior continúa acumulándose en el núcleo, el centro de éste aumenta en densidad y temperatura. Con el tiempo, estas variables adquirirán un tamaño en que las moléculas de hidrógeno diatómico se disociarán en átomos de hidrógeno. En esta fase, la temperatura de la nube es de unos 2000 grados Kelvin y la densidad se aproxima a los 10^{16} átomos por centímetro cúbico.

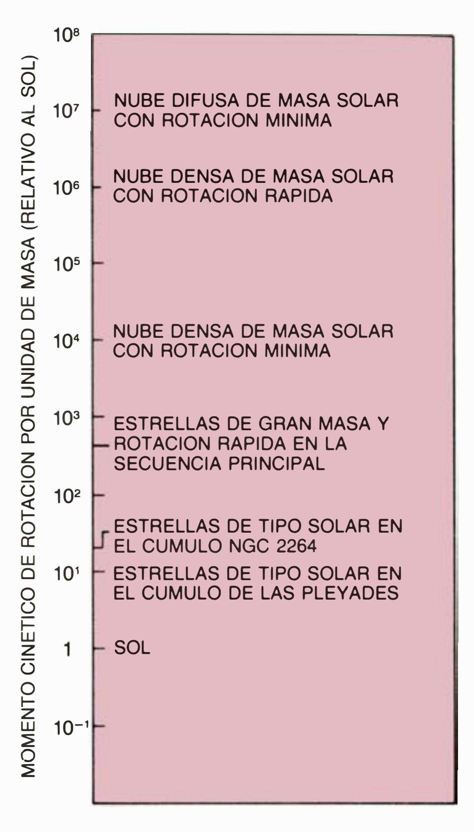
Como el hidrógeno absorbe energía para disociarse, la temperatura del primer núcleo disminuye y hay menos presión térmica para soportar la masa de la nube. Por consiguiente, el primer núcleo entra en una segunda fase de colapso dinámico. Las regiones más interiores se contraen rápidamente hasta que el núcleo adquiere densidades en torno a los 10^{24} átomos por centímetro cúbico (que viene a ser la densidad del agua) y temperaturas de unos 100.000 grados Kelvin. En este punto, la presión térmica torna a adquirir un valor suficiente para contrarrestar la fuerza de la gravedad que ha estado atrayendo la materia hacia dentro. Puede formarse, así, un segundo núcleo, menor que el primero. Inicialmente, este núcleo contiene sólo una pequeña fracción de la totalidad de la nube y posee un tamaño de unas pocas veces el solar. Sin embargo, el resto de la nube continúa cayendo hacia dentro y penetrando en el segundo núcleo. A medida que la materia que cae se acumula, el segundo núcleo sustituye al primero, que desaparece.

Después que se ha formado el segundo núcleo y el resto de la nube se contrae a su alrededor, la protoestrella entra en la secuencia principal de la evolución estelar. La totalidad del colapso dinámico ha durado unos 100.000 años.

La descripción de Larson del colapso de nubes con simetría esférica, esbozado más arriba, concuerda en sus líneas generales con las observaciones. En otras palabras, proporciona modelos de estrellas cuyas luminosidades y temperaturas en superficie caen dentro de los dominios observados para estrellas jóvenes. No obstante, la hipótesis de una nube perfectamente esférica y sin rotación es una clara idealización. La rotación y la heterogeneidad dentro de la nube, ninguna de las cuales se incluye en el modelo de Larson, tienen importantes efectos sobre el modelo y el tipo del colapso. Vale la pena resaltar que el modelo esférico y sin rotación es incapaz de explicar la fragmentación y el problema del exceso de momento cinético.

El paso siguiente hacia una descripción teórica más ajustada fue dado, en 1972, por Larson y, en 1976, por David C. Black, del Centro de Investigación Ames de la NASA, y Peter H. Bodenheimer, del Observatorio Lick de la Universidad de California en Santa Cruz. Estos investigadores estudiaron el colapso de una nube en rotación; para tener un modelo relativamente sencillo, supusieron que la nube era simétrica respecto a su eje. Vieron que una densa nube en rápida rotación puede colapsar, en varias fases, hasta formar un anillo. Bajo ciertas condiciones, este anillo se puede fragmentar en un sistema de protoestrellas.

En la primera fase, la materia situada a lo largo del eje de rotación colapsa hacia el centro, de la misma manera que lo hacía la materia en una nube no giratoria. La materia distante del eje colapsa más lentamente, porque una gran parte de la fuerza de gravitación, que ordinariamente se emplearía en atraerla hacia el centro, se necesita para mantenerla en órbita alrededor del eje de rotación. Dicho de otra manera, a causa de la rotación de la nube, la materia que la constituye experimenta una "fuerza centrífuga" aparente; la materia tendería a salir disparada a lo largo de una trayectoria rectilínea; la gravedad anula esa tendencia y obliga a la materia a recorrer una trayectoria curvilínea. Cuanto más rápidamente se esté moviendo la materia y cuanto menor sea su órbita, tanto mayor será la porción de fuerza gravitatoria necesaria para mantenerla en órbita y tanto menor la porción disponible para atraerla hacia el interior.



3. MOMENTO CINETICO y teoría de la formación de estrellas. Las estrellas tienen momentos cinéticos mucho menores que las nubes de las cuales se forman. La tabla da el momento cinético por unidad de masa (en unidades de momento cinético del Sol) para ciertos tipos de nubes y estrellas.

Como la materia que se halla a lo largo del eje se contrae más rápidamente que la materia que está lejos del mismo, la nube, antes esférica, se aplasta, formando otra en forma de tableta que, progresivamente, se hace más plana y parecida a un disco al colapsar. Con el tiempo, y por razones que describiera Joel E. Tohline (hoy en la Universidad del estado de Luisiana en Baton Rouge) y el autor, el disco forma un anillo.

Tohline y el autor mostraron que el anillo debíase a la interacción entre la fuerza gravitatoria y la ley de conservación del momento cinético. El momen-

to cinético de un cuerpo en rotación depende, en parte, de la distancia entre la materia en rotación en dicho cuerpo y el eje de rotación. Puesto que el momento cinético de un cuerpo aislado en rotación debe mantenerse constante, la materia que cae hacia el centro debe girar con mayor rapidez a medida que cae. Esto significa que la materia en órbita no puede caer siempre hacia el centro: al acelerarse, hace falta una mayor proporción de la fuerza gravitatoria para impedir que salga tangencialmente. Con el tiempo, la materia que cae alcanzará el "equilibrio centrífugo", en el que la fuerza de gravedad es exactamente la suficiente para mantener la órbita de la materia con radio constante.

Durante el colapso de una nube en rotación, parte de la materia que cae hacia el centro alcanza y sobrepasa el radio de equilibrio centrífugo. Aquí la fuerza de gravedad no alcanza a mantener esta materia en una órbita pequeña; por consiguiente, la materia deja de caer hacia el centro y comienza a moverse alejándose del mismo (bajo la influencia de una "fuerza centrífuga" aparente).

Mientras tanto, otra materia que se encuentra más lejos del eje está todavía cayendo hacia el centro. En la colisión resultante entre la materia que cae hacia el eje y la que se mueve hacia fuera, llega a acumularse una cantidad de masa importante lejos del centro axial de la nube. Si la acumulación adquiere un tamaño suficiente, la fuerza gravitatoria que ejerce atraerá al resto de la materia que cae, así como a la materia de las regiones centrales. Resulta así un anillo creciente de gas y polvo alrededor de una región central vacía.

Thomas L. Cook, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Michael L. Norman, actualmente en el Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Munich, han mostrado que tal anillo podría fragmentarse con el tiempo: si el anillo no es perfectamente simétrico alrededor de su eje, se formarán acumulaciones a lo largo de su circunferencia que, con el tiempo, romperán el anillo en un sistema de muchas protoestrellas. Cook y Norman hallaron que el momento cinético de rotación de cada fragmento quedaría en una décima parte del momento de la nube inicial. El modelo muestra que el resto del momento cinético de la nube va a parar a los movimientos orbitales de los fragmentos, unos en torno a otros.

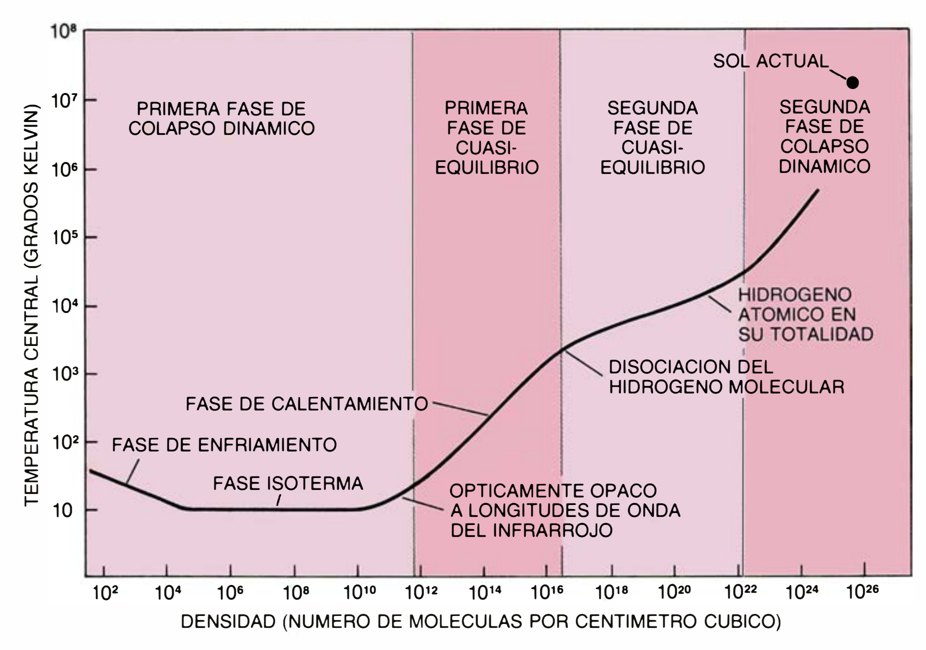
El siguiente avance teórico se produjo en 1979, cuando se consiguió modelar nubes completamente asimétricas en rápida rotación. Bodenheimer, Tohline, Black y el autor hallaron que algunas nubes en contracción podían fragmentarse sin formar anillos; podían desarrollarse irregularidades de la nube hasta el punto de hacerla saltar en pedazos. El proceso tardaría en completarse aproximadamente el mismo tiempo que una nube axialmente simétrica necesita para formar un anillo. Hallaron también que las nubes que tendían a romperse sin formar anillos solían engendrar sistemas binarios, con preferencia a sistemas dotados de tres o más integrantes; al parecer, los dos primeros conglomerados que surgen atraen hacia sí el resto del gas y el polvo.

Los fragmentos iniciales que se forman a partir de nubes en rápida rotación vienen a tener la décima parte de la masa de la nube inicial; igual que en el caso de los fragmentos de anillos, su momento cinético de rotación por unidad de masa es mucho menor que el de la nube original. Además, cada fragmento puede experimentar un segundo colapso dinámico. Al contraerse, cada uno de ellos se rompe en otro conjunto de fragmentos. Estos colapsan, a su vez, con el consiguiente despedazamiento.

Esta sucesión de colapsos y fragmentaciones repetidos fue postulada por Bodenheimer en 1978, antes de que llegaran los cálculos numéricos para nubes completamente asimétricas. Su confirmación por los modelos resuelve ambas cuestiones: la relativa a la fragmentación y la cuestión del momento cinético. Si una nube experimentase una cascada de muchas fragmentaciones, podría colapsar para formar un modesto número de protoestrellas cuyos momentos cinéticos de rotación fuesen bastante próximos a los de algunas estrellas observadas de rápida rotación. Además, la teoría jerárquica sugiere, como lo confirma la observación, la formación de más estrellas binarias que estrellas únicas.

A pesar de su utilidad, los modelos de ordenador de nubes asimétricas han tenido, hasta hace muy pocos años, un defecto importante. A diferencia del modelo de Larson de la nube perfectamente simétrica, éstos no tomaban en cuenta los factores termodinámicos. Es decir, no modelaban el calentamiento y enfriamiento de las diversas porciones de la nube a medida que los iba controlando el flujo de radiación electromagnética. Este depende, a su vez, de la opacidad y densidad de las partículas de gas, polvo dentro de la nube, factores que varían con la contracción de la nube. Por culpa de este defecto, los modelos de ordenador sólo abordaban la fase isoterma (período del primer colapso dinámico durante el cual la temperatura de la nube permanece constante) y en la que los efectos de la radiación se pueden despreciar.

El trabajo más reciente del autor remedia este inconveniente; se trata de un análisis detallado de la termodinámica de las nubes asimétricas. Métodos más complicados hacen posible seguir el colapso de la nube a través de la fase isoterma y de la fase siguiente. En esta última aumenta la opacidad, se forma



4. RELACION ENTRE LA TEMPERATURA Y LA DENSIDAD: cambia a medida que una nube con simetría esférica se contrae. Una nube interestelar debe multiplicar su densidad por un factor de aproximadamente 10^{24} y su temperatura por 10^6 antes de que pueda contraerse y engendrar una estrella. Las condiciones en el centro del Sol en la actualidad se representan a efectos comparativos (*arriba, derecha*).

el primer núcleo y termina en la región central de la nube el primer estadio del colapso dinámico y de la fragmentación.

Los cálculos han mostrado que hay ciertos tipos de nubes que, probablemente, no se fragmentarán en absoluto, sino que colapsarán para engendrar protoestrellas únicas. Por ejemplo, una nube de polvo con masa inferior a una décima parte de la del Sol no sufrirá la sucesión de repetidos colapsos y fragmentaciones. De manera análoga, una nube en rotación lenta que tenga una masa algo mayor puede contraerse en una protoestrella única.

Esta clase de nube se aplastará hasta convertirse en disco que, gradualmente, tomará la forma de una barra alargada. En virtud de la conservación del momento cinético, la parte interior de la protoestrella girará más deprisa que la parte exterior; en consecuencia, la barra se alargará con el tiempo, formando dos brazos espirales.

La región más interior de la protoestrella espiral cederá parte de su momento cinético a la región exterior, de rotación más lenta, mediante pares de fuerzas gravitatorias; es decir, la gravedad de la parte más externa y de rotación más lenta atraerá al centro en rotación más rápida, retardando su movimiento [*véase la figura 5*]. A medida que la materia más próxima al eje de rotación decelera, puede proseguir en su condensación. La protoestrella puede contraerse entonces hasta llegar a densidades estelares, sin sufrir fragmentación instada por un momento cinético excesivo; este resultado está todavía por confirmar.

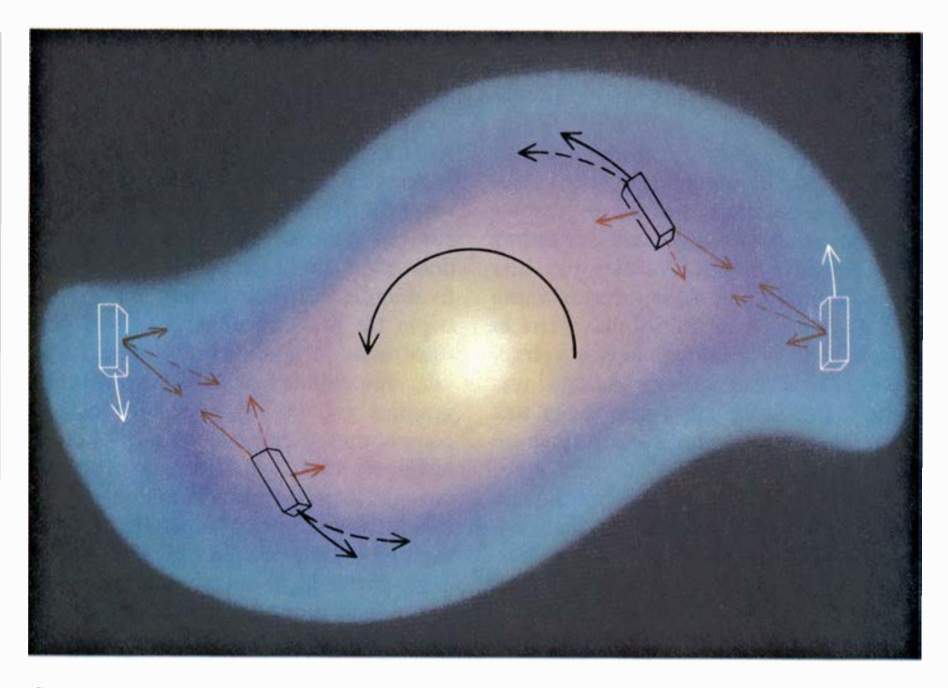
Estos modelos avanzados para la formación general de las estrellas se pueden aplicar a un caso específico: la constitución de nuestro propio Sol y del sistema solar. Tres son los modelos primarios diseñados para explicar sus fases preliminares. Según el primero, el Sol sería, en su origen, parte de un sistema estelar múltiple; es el modo menos probable. El segundo y tercer modelos sugieren, respectivamente, que el Sol evolucionó a partir de un sistema binario en decadencia y que se formó a partir de una única protoestrella de rotación lenta; ambos coinciden en predecir la misma secuencia de acontecimientos, una vez se ha formado la protoestrella.

De acuerdo con el primer modelo, el Sol fue expulsado de un sistema que contenía tres o más protoestellas igualmente espaciadas. El modelado numérico ha mostrado que los sistemas múltiples evolucionarán para formar combinaciones de sistemas binarios de protoestrellas y estrellas únicas; no es inconcebible, por tanto, que el Sol fuese, en un comienzo, parte de un sistema múltiple que se desintegró.

Pero resulta improbable que el Sol se formase de esta manera. De acuerdo con esa recreación numérica, una nube debe estar en rápida rotación y ser relativamente fría para formar un sistema triple de protoestrellas. Las tres protoestrellas originadas tendrían, a su vez, velocidades de rotación bastante grandes y bajas energías térmicas; se contraerían y fragmentarían. Una estrella en rápida rotación y con baja energía térmica lograría evitar la fragmentación en el caso único de desarrollar una masa pequeña (inferior a la décima parte de la solar). De aquí que, según este modelo, el Sol debería haberse formado a partir de una protoestrella de masa muy pequeña, para después adquirir la mayor parte de la misma cuando constituía ya una estrella acabada, lo que representa un proceso bastante improbable.

Al parecer, el sistema solar no se desarrolló a partir de un sistema de orden superior. Nació, quizá, de la desintegración de un sistema binario. Piénsese en una nube que se hubiera contraído para formar un sistema de dos protoestrellas muy próximas entre sí. Si el sistema binario tuviera que ceder parte de su momento cinético al exterior, las dos estrellas se acercarían entre sí. Si las dos protoestrellas hubieran ya alcanzado la fase de cuasiequilibrio y no se estuvieran contrayendo más, el acortamiento de su separación provocaría la unión de las dos para formar una protoestrella única. Esta protoestrella se parecería mucho a la que resulta del tercer modelo propuesto de evolución solar, el colapso de una nube en rotación lenta.

Lo explicamos antes, una nube con velocidad de rotación extremadamente lenta no se fragmentaría durante la fase de colapso dinámico. Werner M. Tscharnuter, del Instituto Astronómico de la Universidad de Viena, ha recreado en un modelo el colapso de nubes de simetría axial en rotación lenta y mostrado que no forma anillos. Y llega así a la conclusión de que tales nubes no se fragmentarán. Mis propios cálculos tridimensionales apoyan los resultados de Tscharnuter. Manifiestan también que incluso nubes en lenta rotación se contraerán en protoestrellas con la forma de barra característica de las nubes en rotación rápida; esto significa que las porciones centrales de la protoestrella podrían transmitir parte de su momen-



5. PARES DE FUERZAS GRAVITATORIAS. Transfieren momento cinético hacia el exterior, a lo largo del brazo espiral de un sistema protoestelar en rotación. Las regiones internas (*los volúmenes representativos se delinean mediante cajas negras*) describen sus órbitas más rápidamente que las regiones externas del brazo (*cajas blancas*). Las interacciones gravitatorias (*flechas de trazo continuo en color*) entre las regiones interiores y exteriores originan fuerzas (*flechas de trazos en color*) que retardan la rotación de las regiones más internas y aceleran la propia de la más externas. Al retardarse la rotación de las regiones más internas, éstas caen hacia el centro (*flechas negras de trazos*). Si la materia interior constituye una única protoestrella rodeada de una configuración espiral de gas, esta cesión de momento cinético puede lograr que las regiones centrales se contraigan hasta alcanzar las densidades estelares. (Esquema de I. Worpole.)

to cinético al exterior, por medio de pares gravitatorios, permitiendo que la protoestrella se contraiga hasta densidades estelares. Ello implica que las nubes en rotación lenta formarán estrellas únicas. Y como éstas se hallan en minoría, diríase que las nubes en rotación lenta serán también bastante escasas.

Ambos modelos, el de un sistema binario desintegrado y el de una nube en rotación lenta, convergen en un mismo patrón de formación de una protoestrella única, rodeada de una nube de gas y polvo. En esta fase, la protoestrella debe contraerse hasta un aumento de densidad de 10^{10} veces y experimentar un segundo colapso antes de alcanzar la secuencia principal. Esta fase de la evolución estelar no se ha calculado aún rigurosamente en un modelo tridimensional; ciertas propiedades físicas que no se han tratado aquí, tales como la turbulencia y los campos magnéticos, podrían ejercer también efectos poderosos.

Al mismo tiempo que el Sol se está formando en el centro de la nebulosa, el polvo de las regiones más externas creará una capa aplanada e iniciará el proceso de acumulación para constituir un sistema planetario. Gas y polvo circundantes pueden ser esenciales para la formación de una estrella única, pues proporciona a la protoestrella un medio para dispersar parte de su momento cinético que, en caso contrario, entorpecería su colapso. La formación de un sistema planetario puede ser, así, una consecuencia natural de la formación de una estrella única. El reciente descubrimiento, del máximo interés, de una capa aplanada de polvo en torno a la estrella Beta del Pintor parece confirmar este cuadro general de la formación de estrellas y planetas.

A medida que los astrofísicos han venido formulando hipótesis cada vez más realistas acerca de las nubes de polvo, se ha ido diseñando una imagen más clara del proceso de la formación estelar. El paso siguiente en las investigaciones del autor será el de extender los modelos termodinámicos a nubes completamente asimétricas. Hasta ahora, el modelo se ha aplicado sólo a la primera fase de cuasi-equilibrio, la formación del primer núcleo; el siguiente paso será estudiar la fase del segundo colapso dinámico. El autor cree que no se produce fragmentación ulterior después de formado el primer núcleo y que la protoestrella se contrae hasta densidades estelares, pero la respuesta definitiva sólo llegará con una simulación rigurosa, en la que quizá se inviertan varios años más.

Percepción del habla en la primera infancia

Al percibir el habla, los seres humanos detectan categorías fonémicas discretas e ignoran gran parte de la variación de la señal hablada. Las investigaciones realizadas con bebés sugieren el carácter innato de los mecanismos subyacentes

Peter D. Eimas

¿Cómo se explica que los niños aprendan a hablar y entender a tan temprana edad y, aparentemente, sin dedicarle a la tarea mayores esfuerzos? El proceso de adquisición del lenguaje comienza bastante antes de cumplirse el primer año. A los tres, la mayoría de los niños utiliza el lenguaje con habilidad considerable. En contraste con el aprendizaje de la lectura o la aritmética, el niño domina el lenguaje sin pasar por enseñanza formal alguna; de hecho, gran parte de ese aprendizaje transcurre dentro de un entorno lingüístico bastante limitado, que no especifica de manera precisa las reglas que gobiernan su uso competente.

Una posible explicación del rápido desarrollo de la habilidad lingüística del niño es que el lenguaje no es tan complejo como suele creerse y, en consecuencia, que, a partir de principios psicológicos tan simples como el condicionamiento y la generalización, se explica la velocidad con que se aprende. Pero la investigación realizada durante las pasadas décadas sobre la naturaleza del lenguaje y los procesos en virtud de los que se produce y entiende ha revelado precisamente una creciente complejidad subyacente, y no esa simplicidad de que hablábamos.

Experimentos realizados por el autor y colegas suyos en la Universidad de Brown, y por otros investigadores en diversos centros, han apoyado una explicación diferente, que se deriva de la opinión según la cual ciertos conocimientos y capacidades innatas subyacen al uso del lenguaje, idea ésta de la que el lingüista Noam Chomsky constituye el exponente más notable. En estudios sobre la percepción del habla en bebés hemos comprobado que los infantes poseen una dotación muy rica de mecanismos perceptivos innatos, adaptados a las características del lenguaje humano, que les preparan para el mundo lingüístico al que tendrán que enfrentarse.

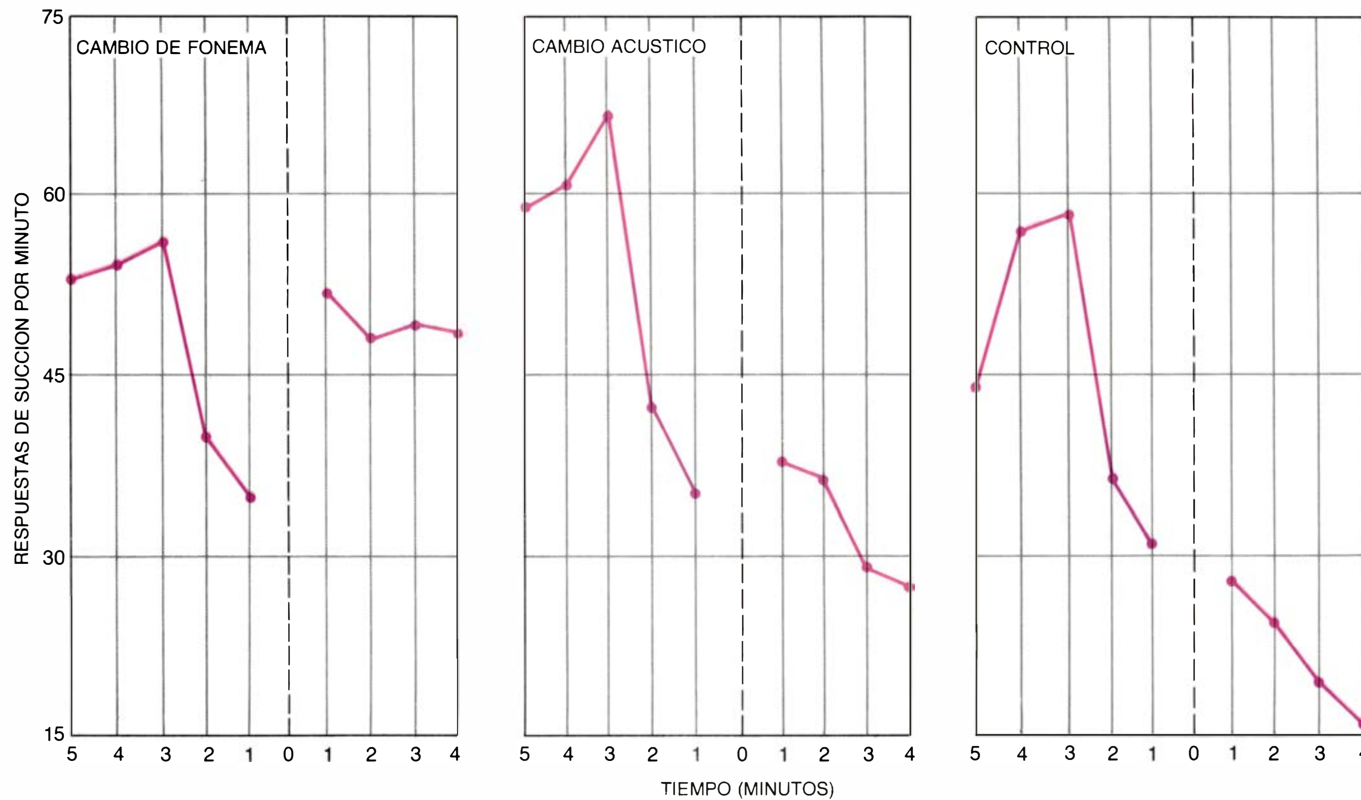
La búsqueda de mecanismos innatos de percepción del habla se desarrolló a partir de estudios de la relación de la señal hablada con los fonemas, unidades que corresponden a las consonantes y vocales del lenguaje. Los fonemas son las menores unidades del habla que afectan al significado: tan sólo un fonema distingue las palabras *tasa* y *rasa* y, sin embargo, sus significados son completamente distintos.

Investigadores de los laboratorios Haskins de New Haven, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, del Real Instituto Sueco de Tecnología y de otros centros, han demostrado que la señal hablada constituye un complejo de unidades acústicas: breves segmentos separados por pausas momentáneas, o picos de intensidad. Esos segmentos varían en duración y frecuencia, relaciones temporales e intensidad de sus bandas constituyentes de energía acústica concentrada (conocidas como formantes) así como de componentes acústicos ruidosos conocidos como aspiración y fricación. La variación de esos parámetros acústicos proporciona información esencial de cara a la percepción de fonemas.

Sin embargo, no existe correspondencia directa, unívoca, entre los segmentos acústicos individuales y los fonemas que percibimos. Un mismo segmento acústico puede encerrar una consonante y una vocal; y al revés, dos segmentos acústicos distintos pueden contribuir a un único sonido consonante. Además, no existe relación directa alguna entre la frecuencia de los segmentos y sus características temporales y los fonemas que oímos.

Consideremos la información acústica que basta para señalar la distinción entre la consonante oclusiva sonora que inicia la palabra *bar* y la consonante oclusiva sorda que inicia la palabra *par*. En ambos casos, el hablante bloquea completamente el flujo del aire a través del tracto vocal inmediatamente antes de la emisión de la palabra; sin embargo, en *bar*, las cuerdas vocales empiezan a vibrar casi simultáneamente con la liberación del aire, mientras que, en *par*, la vibración de las cuerdas vocales se demora. El intervalo entre la liberación de aire y el inicio de la vibración de las cuerdas vocales, esto es, la sonorización, se conoce como tiempo de emisión de la voz; contiene la información acústica crucial que permite al oyente distinguir *bar* de *par*. Sin embargo, los valores del tiempo de emisión de voz no definen los fonemas. Antes bien, los oyentes suelen percibir, para un mismo fonema, un abanico de valores, que reflejan diferentes hablantes, diferentes instancias de habla y diferencias en el entorno fonémico circundante.

Las variables acústicas que definen otros fonemas son análogamente fluidas. Por ejemplo, muchos fonemas se distinguen por el lugar de articulación, el punto de la constricción del tracto vocal que se produce cuando se ha formado el sonido; valen de ejemplo los sonidos *bar* y *dar*. Entre los indicios acústicos que corresponden al lugar de articulación y permiten al oyente distinguir tales fonemas se cuentan las frecuencias iniciales del segundo y tercer formante: los formantes que ocupan el segundo y tercer lugar desde la base de una escala de frecuencias. Una vez más, no existe un valor único de esos parámetros acústicos que caracterice a cada fonema; todo un abanico de frecuencias de emisión pueden señalar el mismo punto de articulación. No obstante, a pesar de la variación de los sonidos correspondientes a cada fonema, poco nos cuesta decidir si se ha dicho

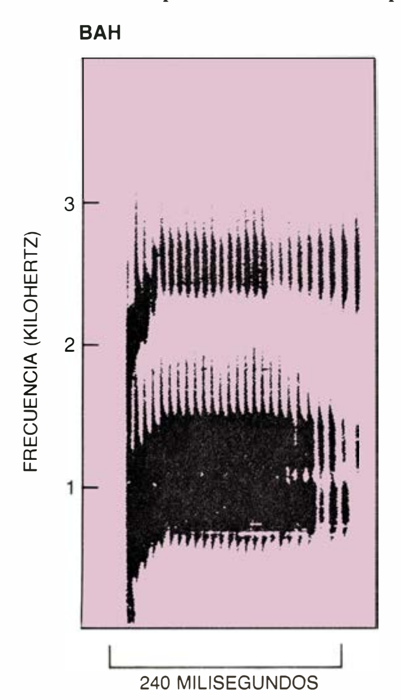


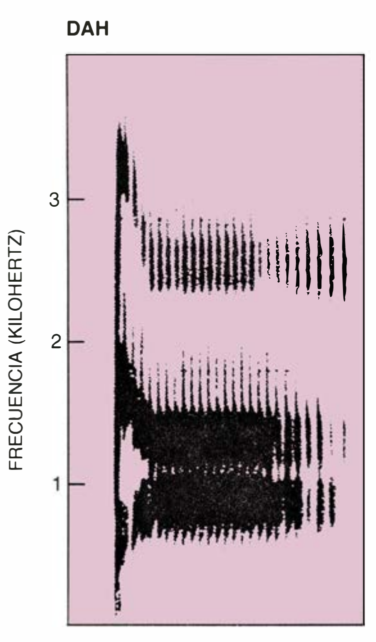
1. SEÑALA EL RITMO DE SUCCION de los bebés su respuesta a una serie de sonidos hablados. En la disposición experimental del autor (*arriba*) se emitían sílabas de habla sintética a través del altavoz situado sobre la pantalla que reflejaba la imagen de una muñeca. El bebé, de cuatro meses, succionaba un chupete conectado a instrumentos de registro. Las gráficas del ritmo medio de succión (*abajo*), registradas en diversas condiciones experimentales y con muchos bebés, indican que cuando se repetía una sílaba que empezaba con una determinada consonante, la tasa de succión aumentaba primero y luego disminuía a medida que el estímulo se hacía familiar. En algunos casos se cambiaba el sonido, en el momento indicado en la gráfica por la línea discontinua. En un grupo (*izquierda*) el nuevo sonido representaba una consonante diferente; el ritmo de succión aumentaba bruscamente, indicando que los bebés percibían cierto contraste. En un segundo grupo (*centro*) el estímulo difería acústicamente del sonido precedente pero correspondía a la misma consonante; se observaban pocos cambios en el ritmo de succión. A un tercer grupo, que hacía las veces de control (*derecha*), no se le alteró el estímulo.

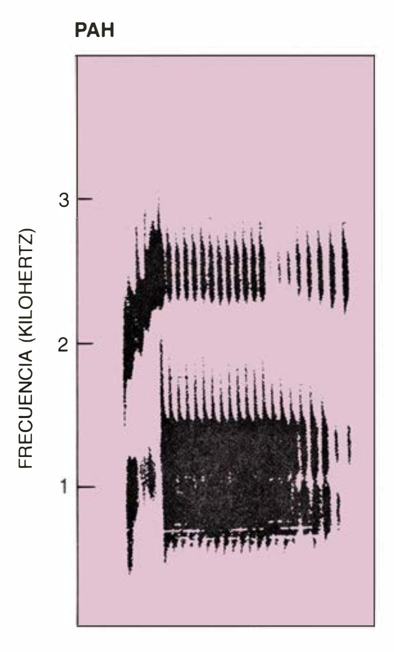
dar o *bar*. De hecho, podemos detectar la variación de la señal y formular juicios categóricos sobre la calidad fonémica.

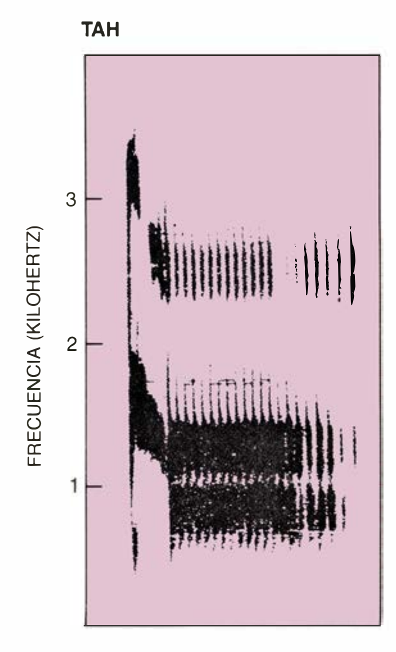
Resultados experimentales confirman la idea de que en la percepción del habla solemos capturar categorías fonémicas discretas y no la variación continua de cada parámetro acústico: percibimos el habla categóricamente. En experimentos realizados por Leigh Lisker y Arthur S. Abramson, de los laboratorios Haskins, se presentó, a sujetos adultos, sonidos de habla generados por ordenador que daban forma a un abanico de diferentes valores de tiempo de emisión de voz. A pesar de las muchas variantes del tiempo de emisión de la voz, los sujetos distinguían casi todos los estímulos, ya se tratara de un fonema sonoro, como la consonante inicial de BAH, o de un fonema sordo, como la consonante inicial de PAH. El límite (el tiempo de emisión de voz al que los oyentes empezaban a oír PAH en lugar de BAH) se situaba aproximadamente en los 30 milisegundos después de la liberación inicial de aire.

Para confirmar la naturaleza categórica de la percepción del habla, los experimentadores pedían a los sujetos que distinguieran pares de estímulos que diferían en el tiempo de emisión de voz. Cuando ambos sonidos representaban demoras de sonorización inferiores a 30 milisegundos, los oyentes generalmente los percibían como dos casos idénticos de BAH; cuando los tiempos de emisión de voz superaban los 30 milisegundos, los oyentes tendían a oír dos PAH, indistinguibles aunque acústicamente diferentes. Tan sólo cuando los estímulos rondaban el límite de los 30 milisegundos los sujetos conseguían separarlos de modo coherente. Catherine G. Wolf, a la sazón en la Universidad de Brown, obtuvo pruebas similares de percepción categórica en niños de edad escolar.









2. EN LOS ESPECTROGRAMAS DE SILABAS que empiezan por diferentes consonantes oclusivas, así llamadas porque requieren una interrupción del flujo de aire que pasa por el tracto vocal, se plasman las diferencias subyacentes a las características acústicas. Estas cuatro signaturas acústicas difieren en la frecuencia y cronometraje de sus bandas de energía acústica, conocidas como formantes. Las consonantes emparejadas en horizontal se distinguen por la frecuencia a la que empiezan los formantes, reflejo del punto en el que se produce la constricción dentro del tracto vocal. La frecuencia del formante más alto del sonido BAH, por ejemplo, empieza a casi dos kilohertz, y luego aumenta, mientras que la del tercer formante de DAH empieza a casi tres kilohertz y luego desciende. Las consonantes emparejadas en vertical difieren en el tiempo de emisión de la voz, que constituye una medida de la demora entre la liberación del aire y la vibración de las cuerdas vocales. En los espectrogramas de BAH y DAH se distingue un tiempo de emisión de voz nulo, y así lo indica la inmediata presencia de periodicidad: una serie de estriaciones verticales bien marcadas que corresponden a la vibración de la cuerda vocal, al principio de los tres formantes. En PAH y TAH se advierte un hueco antes de la aparición del formante más suave, empezando la periodicidad en los dos más agudos; refleja ello una demora más larga de la emisión de la voz.

¿Qué proporción de ese mecanismo de percepción categórica que nos permite percibir el habla de modo fiable, a pesar de la falta de precisión de la señal hablada, es innata? Los hablantes de diferentes lenguas están habituados a distinciones fonémicas algo diferentes, hecho que sugiere que la influencia del entorno lingüístico sobre la percepción del habla es muy poderosa. Las personas de habla japonesa no perciben el contraste entre los fonemas /r/ y /l/, distinción corriente en las lenguas occidentales; los de lengua inglesa, por su parte, no captan ningún contraste fundamental en la sonorización que distingue ciertos fonemas del tailandés. Sin embargo, ciertas distinciones fonémicas están presentes en las lenguas de todo el mundo. Mis colegas y yo dedujimos de ello que quizá subyacieran a la percepción categórica del habla fuertes determinantes biológicos, modificados por la experiencia lingüística posterior. Para contrastar la verosimilitud de la hipótesis emprendimos una serie de experimentos con bebés que aún no hablaban, y en los que era de esperar que la influencia de la lengua de sus padres fuera mínima.

En 1971, Einar R. Siqueland, Peter W. Jusczyk, James Vigorito y el autor examinaron la percepción del tiempo de emisión de voz en bebés de uno y de cuatro meses de edad. Expusimos a los

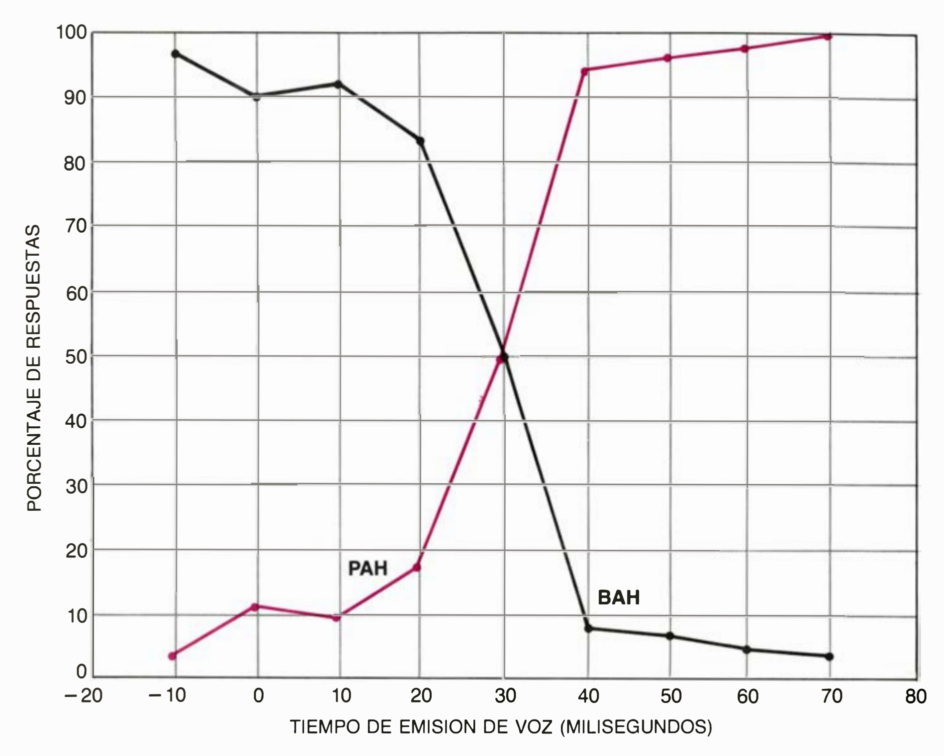
bebés tres pares diferentes de sonidos. Los tiempos de emisión de voz de uno de los pares eran de 20 y 40 milisegundos; los estímulos, por tanto, caían a ambos lados del límite de categoría reconocido por hablantes adultos de lengua inglesa y de otras. A los oídos adultos, los estímulos sonaban como las sílabas BAH y PAH. En los otros pares, cuyos tiempos de emisión de voz eran de cero y 20 milisegundos, y de 60 y 80 milisegundos, ambos estímulos caían al mismo lado del límite sonoro/sordo; ambos eran ejemplos de BAH o PAH.

Los bebés de pocos meses no informan directamente de sus percepciones. A fin de registrar sus respuestas a los estímulos recurrimos a la metodología denominada procedimiento de succión de elevada amplitud. Se le daba al bebé un chupete empalmado a un transductor de presión, que a su vez se conectaba a instrumentos de registro. Ajustamos la sensibilidad del artilugio para cada bebé, de manera que en cada caso registrara un ritmo de succión de 20 a 40 veces por minuto, que se consideró la línea base.

Una vez puesto en marcha el experimento, cada vez que el aparato registraba una succión se emitía un sonido de algún par de estímulos. Cuando un bebé percibe un estímulo nuevo, su ritmo de succión suele incrementarse durante varios minutos; después, poco a poco, va disminuyendo conforme se familiariza con él. Cuando los ritmos de succión de nuestros sujetos descendían hasta su nivel inicial, acostumbrados al primer sonido, cambiábamos de estímulo, presentándoles el otro sonido del par elegido. Si un bebé se familiariza con un estímulo y de pronto se le presenta otro que juzga diferente, su ritmo de succión suele incrementarse.

Los resultados mostraron que los bebés, como las personas que dominan una lengua, perciben diferencias en el tiempo de emisión de voz de forma categórica. Cuando ambos sonidos del par correspondían al mismo lado del límite de los 30 milisegundos, el cambio de un sonido por otro no provocaba incremento alguno del ritmo de succión. Los niños no parecían advertir el cambio del tiempo de emisión de voz. Por el contrario, cuando los estímulos caían a lados distintos del límite, se producía un acusado incremento del ritmo de succión coincidiendo con el cambio, señal de que los bebés lo percibían.

Otros investigadores, y el propio autor, han descubierto más límites perceptivos en respuestas de bebés a la información acústica contenida en el habla. Igual que los adultos, responden categóricamente a cambios de la frecuencia de emisión del segundo y tercer formantes, señales acústicas que indican diferencias en el punto de articulación de una consonante. Ese mismo patrón se mantiene en sus respuestas a las señales acústicas que marcan las distinciones entre consonantes nasales y oclusivas, ejemplificadas por los sonidos iniciales de MAH y BAH, y entre consonantes oclusivas y semivocales, tales como el sonido inicial, en inglés, de WAH [pronunciado UA].



3. PERCEPCION CATEGORICA. Se refleja en estas curvas, que indican las proporciones relativas de respuestas cuando se pide a los niños que identifiquen un sonido de habla sintética dotado de un determinado tiempo de emisión de voz, como por ejemplo un sonido consonántico sonoro (BAH) o uno sordo (PAH). En lugar de un cambio lineal en los porcentajes, las curvas muestran que ante tiempos de emisión de voz de menos de 30 milisegundos los niños casi siempre identificaban el estímulo como BAH; cuando el tiempo de emisión de voz excedía los 30 milisegundos, tendían a percibir el sonido como PAH. La tendencia perceptiva cambiaba bruscamente a los 30 milisegundos. Este estudio, realizado por Catherine G. Wolf, en la Universidad de Brown, sugiere que la percepción del habla se configura por categorías perceptivas, y no atendiendo a las gradaciones continuas que se dan en las propiedades acústicas de la señal hablada.

Resulta difícil atribuir al aprendizaje ese modo de percepción que hemos observado en los infantes. ¿Qué acontecimientos vividos en sus primeras semanas habrían de prepararles para responder categóricamente a las gradaciones de las propiedades acústicas? Una idea menos complicada sería que la categorización se produce porque el niño nace con mecanismos perceptivos que sintonizan con las propiedades del habla. Esos mecanismos no serían sino los precursores de las categorías fonémicas que más tarde permitirán al niño convertir la señal variable del habla en una serie de fonemas, y más tarde, en palabras y significados.

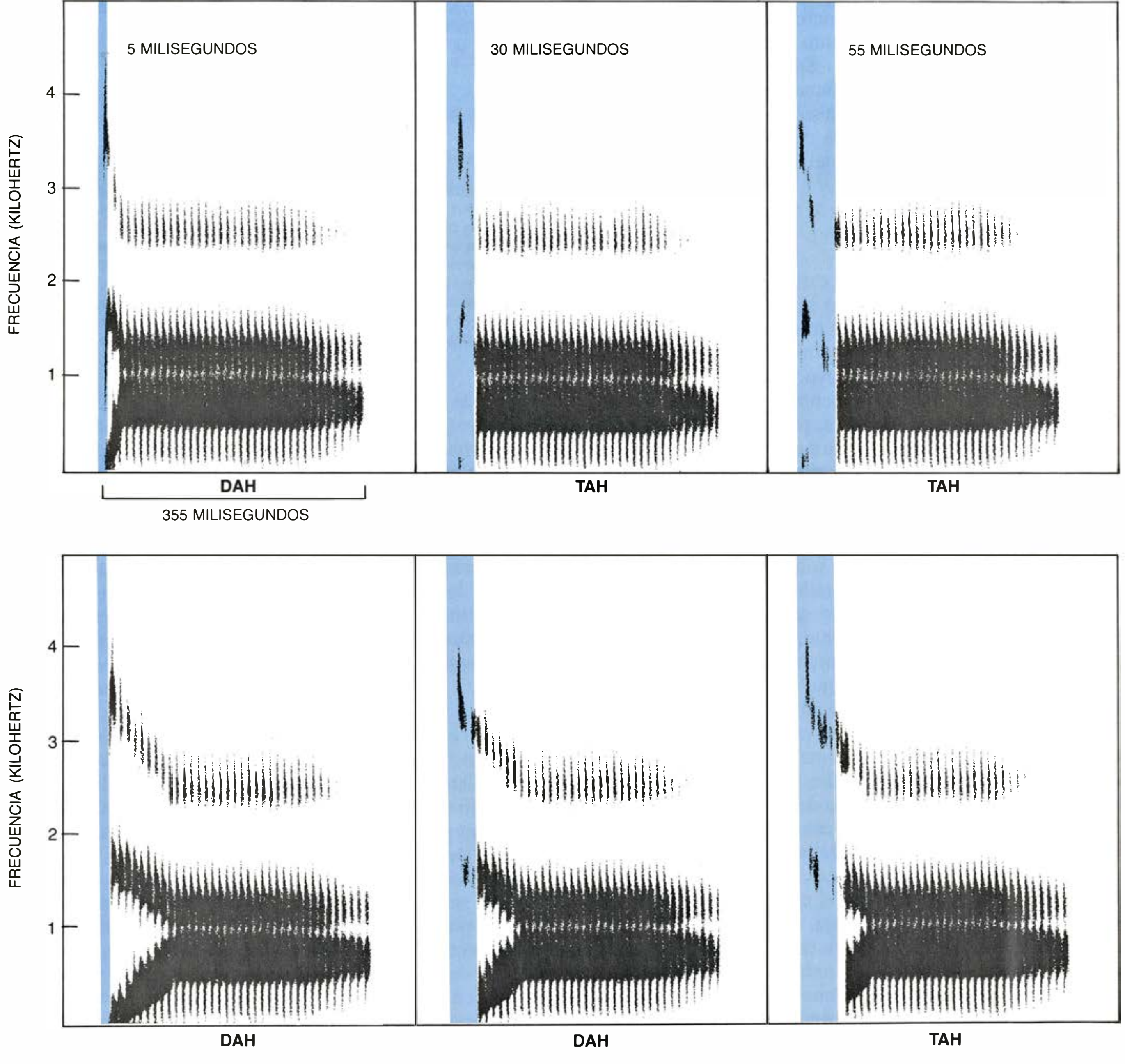
Si esos mecanismos perceptivos corresponden, en efecto, a una característica biológica, habrán de ser universales. En los bebés de todos los bagajes lingüísticos deberán aparecer los mismos patrones perceptivos. En una investigación publicada en 1975, Robert E. Lasky, Robert E. Klein y Ann Syrdal-Lasky, a la sazón en el Instituto de Nutrición de Panamá, estudiaron la percepción del tiempo de emisión de voz en bebés guatemaltecos nacidos en un entorno de habla hispana. Los métodos experimentales de este grupo diferían de los utilizados en nuestro estudio de 1971: en lugar del cambio del ritmo de succión emplearon la alteración de la frecuencia cardiaca como indicador de la respuesta de los bebés a los patrones de habla. El estudio también ponía a prueba la sensibilidad a una categoría de sonorización que nosotros habíamos omitido, que se hallaba entre consonantes oclusivas iniciales de sílabas del tailandés y de otras numerosas lenguas, pero no en la inglesa. En esa categoría, llamada presonora, las cuerdas empiezan a vibrar 100 milisegundos antes de la liberación de aire, en una especie de susurro preliminar.

Lasky y sus colaboradores sometieron a los bebés tres pares de estímulos. En el primer par, la emisión de voz se daba a 20 y 60 milisegundos tras la emisión consonántica; así, los dos sonidos

caían en lados opuestos del límite sonoro/sordo identificado por quienes hablan inglés u otros idiomas, aunque, como se vio, no por los de lengua española. Los estímulos del segundo par presentaban emisión de voz 60 y 20 milisegundos antes de la emisión consonántica y caían a lados opuestos del límite presonoro/sonoro del tailandés. En los sonidos del último par, la sonorización comenzaba 20 milisegundos antes y 20 después de la emisión consonántica. Los hispanohablantes, en contraste con los de muchas otras lenguas, perciben el límite sonoro/sordo enclavado entre esos dos valores.

Los registros de frecuencia cardiaca arrojaban ciertos incrementos acontecidos cuando los bebés, que se habían ido acostumbrando al primer sonido de un par de estímulos, oían el segundo sonido. Los datos mostraban que los jóvenes sujetos respondían a la distinción presonoro/sonoro, con el límite colocado entre 60 y 20 milisegundos antes de la emisión consonántica, así como a la distinción sonoro/sordo, con el límite situado entre 20 y 60 milisegundos después de la emisión. La distinción de sonorización característica de quienes hablan español no provocaba cambios en el ritmo cardiaco.

En 1976, Lynn A. Streeter, a la sazón en los laboratorios Bell, publicó datos en apoyo de que los bebés nacidos en una cultura de Kenia que habla kikuyu presentaban prácticamente el mismo patrón perceptivo que los niños guatemaltecos. Richard N. Aslin, David B. Pisoni, Beth L. Hennessy y Alan J. Perey, de la Universidad de Indiana, han concluido recientemente un estudio sobre la sensibilidad del tiempo de emisión de voz en bebés de comunidades angloparlantes; han comprobado que responden al contraste presonoro/sonoro de igual modo que lo hacen a la distinción sonoro/sordo. Parece que los



4. CAMBIO EN EL LIMITE PERCEPTIVO. Puede producirse cuando se alteran independientemente dos señales acústicas. Las consonantes que inician las seis sílabas mostradas en forma espectrográfica presentan diferencias en el tiempo de emisión de voz y en la frecuencia de aparición del formante más grave; para un oído adulto, los sonidos son las sílabas DAH y TAH. A una frecuencia elevada de aparición (*segundo y tercer espectrogramas de la fila superior*) los bebés detectaban el contraste DAH/TAH entre dos sonidos cuyos tiempos de emisión de voz eran de cinco y 30 milisegundos. Si la frecuencia de aparición era grave (*segundo y tercer espectrogramas de la fila inferior*), el tiempo de emisión de voz tenía que aumentar hasta 30 o 55 milisegundos para que los bebés reaccionaran ante el contraste. Tales interacciones entre dos variables acústicas se conocen como relaciones perceptivas de trueque.

/A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/ . . . /A/



/I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/ . . . /I/



5. RECONOCIMIENTO DE UN CONTRASTE FONEMICO en un experimento diseñado por Patricia K. Kohl, de la Universidad de Washington, para estudiar la habilidad de los bebés a la hora de distinguir fonemas que contrastan de entre variaciones acústicas de un mismo fonema. En este caso, el bebé, cuya atención se atrajo mediante un juguete, ignoraba las variaciones del hablante y las distintas entonaciones de las repeticiones del sonido vocal /a/, de /pa:p/, (*arriba*). Cuando se interrumpía la secuencia con sonidos vocales /i/, de /pi:p/, el bebé se volvía hacia el altavoz (*abajo*), en manifestación de que reconocía el importante contraste lingüístico. Se recompensaban las respuestas correctas iluminando un muñeco.

bebés de todo el mundo están dotados de una sensibilidad innata a esas tres categorías de sonorización, sean o no importantes dichas distinciones en sus respectivas lenguas maternas.

La percepción del habla constituye un proceso complejo y sutil que los estudios sobre la percepción categórica conocidos describen sólo en los términos más simples. La información acústica que permite a un oyente percibir distinciones de sonorización vale de ejemplo. Hasta ahora hemos tratado la información esencial como un continuo temporal único, midiendo el intervalo entre la emisión consonántica y el comienzo de la sonorización. Sin embargo, en el habla común, lo que gobierna la percepción de las distinciones de sonorización es cierta interacción de factores temporales y espectrales. Tales propiedades acústicas interactúan, constituyendo lo que podríamos llamar relaciones perceptivas de trueque: un cambio del valor de una propiedad altera el valor de otra sobre la que incide el límite perceptivo.

Por ejemplo, debido a las características funcionales de los mecanismos de articulación, la frecuencia del primer formante, el más grave, aumenta a medida que se incrementa el tiempo de emisión de voz. Nuestro sistema perceptivo parece estar sintonizado con esa relación: un cambio de frecuencia puede sustituir a un cambio en el indicio temporal. Si el primer formante empieza a una frecuencia más aguda, el efecto equivale a un alargamiento del tiempo de emisión de voz, de modo que, a frecuencias de emisión más altas, los adultos perciben antes, en el continuo de tiempos de emisión de voz, el límite sonoro/sordo.

Sutilezas semejantes se observan en los sistemas perceptivos de los bebés. En 1983, Joanne L. Miller, de la Northeastern University, y el autor demostraron que en las respuestas de los bebés se daba una relación perceptiva de trueque como la de los adultos. Comprobamos que el tiempo de emisión de voz al que los niños de tres y cuatro meses de edad identificaban un cambio del sonido inicial sonoro de la sílaba DAH al sonido sordo de TAH variaba con la frecuencia de aparición del primer formante.

Una segunda complicación del proceso perceptivo se deriva del hecho de que los límites de categorías percibidos por los adultos no sólo cambian por interacción de múltiples señales, sino también por variaciones del contexto acústico. A este respecto, también los bebés exhiben los precursores de patrones de percepción más maduros. Miller y el autor han demostrado que los infantes, igual que los adultos, distinguen la consonante oclusiva de BAH y la semivocal de WAH (en inglés) de manera diferente, según la duración del sonido vocal que siga. La base acústica de la distinción es la longitud de las transiciones de formante: los períodos necesarios para que las frecuencias centrales de los formantes alcancen los valores adecuados para la vocal que sigue. En el caso de BAH, las transiciones de formante son rápidas; con WAH, son más lentas. Sin embargo, cuanto más larga es la duración de la vocal, más lentas deben ser las transiciones de formante para que el bebé identifique un cambio en el estímulo de BAH a WAH.

Se han puesto de relieve otros efectos bastante complejos del contexto sobre la categorización del habla por parte de los bebés. Jusczyk y sus colegas, de la Universidad de Oregon, descubrieron un cambio en las frecuencias de aparición de formantes en el que los bebés detectaban cierta distinción entre fonemas que diferían en el punto de articulación. El valor límite variaba si se presentaba una banda adicional de energía acústica ruidosa, señalando una consonante fricativa en lugar de oclusiva.

El complejo mecanismo de la percepción categórica permite a los individuos identificar fonemas a pesar de la gran variación que puede darse en los parámetros acústicos más esenciales. Otros tipos de variabilidad confunden aún más la definición de la señal del habla. La longitud de las sílabas, junto con otras características temporales del habla, varía con la frecuencia del mismo y los patrones de énfasis; según el sexo, edad y estado emocional del

hablante se producen amplias variaciones en la frecuencia fundamental de sonorización, así como en el espaciamiento de frecuencias resonantes. Algún mecanismo nos permite eludir la variación y distinguir el mismo fonema cada vez que se pronuncia. Ese fenómeno de constancia perceptiva no puede estudiarse directamente en los bebés. Sin embargo, los estudios realizados sobre la capacidad de aquéllos para formar clases de equivalencia (grupos de estímulos que evocan la misma respuesta a pesar de presentar diferencias obvias) sugieren que los bebés poseen, al menos, los precursores de esa constancia perceptiva.

Patricia K. Kuhl y sus colegas, de la Universidad de Washington, han estudiado la formación de clases de equivalencia para los sonidos del habla en bebés de seis meses. En la primera etapa de cada experimento, el grupo de Kuhl entrenó a los pequeños a girar la cabeza 90 grados hacia un altavoz cada vez que una serie de estímulos de contraste interrumpía un sonido de fondo; la imagen de un juguete de colores que aparecía sobre el altavoz cuando se conectaba la secuencia de contraste recompensaba las respuestas acertadas. En un experimento se empleó el sonido vocal /a/ [a velarizada, como en /pa:p/], como estímulo de fondo; la emisión repetida de /i/, como en /pi:p/, aportaba el contraste. Una vez finalizado el entrenamiento, se variaron los estímulos: se mantuvieron las vocales /a/ e /i/, pero ahora se presentaban ambas vocales en diversidad de voces y entonaciones. Servían de control secuencias sin estímulos de contraste, en las que todo sonido era una variante de /a/.

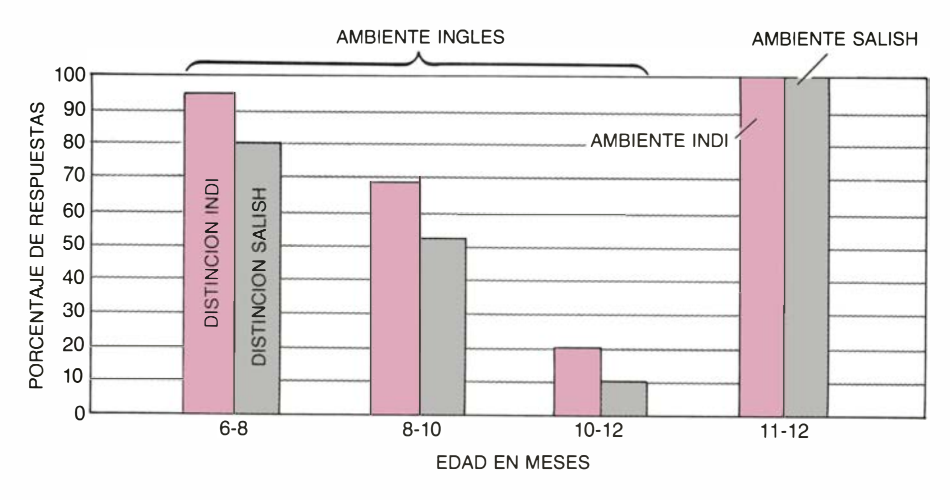
El éxito de los bebés a la hora de señalar los estímulos de contraste e ignorar variaciones acústicas intracategoriales durante los ensayos de control fue impresionante. Cuando se contaban tanto los giros de cabeza inadecuados como los contrastes desapercibidos se alcanzaba una media de un 80 por ciento de aciertos; en siete de cada ocho casos los bebés puntuaban mejor que si sus respuestas se debieran al azar. Cuando Kohl y sus colegas repitieron el experimento con las vocales, acústicamente menos distintivas /a/ y /ɔ/ (o abierta), los bebés seguían distinguiendo los sonidos equivalentes, aunque de modo menos fiable; la proporción de respuestas correcta ascendía al 67 por ciento y sólo cuatro de cada ocho bebés presentaban una puntuación más alta que la que hubieran arrojado respuestas al azar.

Sin embargo, cuando tanto las secuencias de fondo como las de contraste contenían variaciones de /a/ e /i/ elegidas arbitrariamente, los pequeños no conseguían distinguir los miembros de las dos secuencias, a pesar de que se les recompensaba toda respuesta correcta. No lograban identificar una agrupación arbitraria de sonidos que carecieran de alguna propiedad lingüística común. Sólo respondían correctamente, señal de que tenían organizados los diversos estímulos en clases de equivalencia, cuando las secuencias de fondo y de contraste correspondían a diferentes categorías de habla. Este descubrimiento se sumó a las pruebas de que, mucho antes de que los bebés hablen y comprendan, son especialmente sensibles a las distinciones acústicas que resultarán esenciales para la comprensión del habla, y vino a apoyar a quienes defienden la existencia de mecanismos innatos especializados en la percepción del habla.

La gran diversidad de sistemas sonoros que se aprecia en las lenguas humanas deja bien claro que los factores ambientales afectan a las disposiciones perceptivas de que estamos dotados al nacer. ¿Qué sucede cuando el entorno lingüístico creado por los padres y compañeros de un niño interactúa con sus mecanismos perceptivos innatos? Parece que los horizontes perceptivos se estrechan a medida que el niño aprende su lengua nativa. Conserva, y probablemente agudiza, las capacidades perceptivas que corresponden a distinciones fonémicas propias de su lengua materna, pero pierde la capacidad de detectar distinciones que no se dan en la misma.

Ciertos estudios sobre la percepción del tiempo de emisión de voz testifican en favor del declive de determinadas capacidades discriminatorias a medida que el niño se desarrolla. Mientras que los bebés pertenecientes a entornos lingüísticos diversos responden a contrastes de consonantes iniciales presonoras, sonoras y sordas, los adultos que hablan ciertas lenguas, la inglesa por ejemplo, reconocen tan sólo la distinción entre las categorías sonora y sorda. Aunque los adultos japoneses nativos son prácticamente incapaces de percibir la distinción entre los sonidos /r/ y /l/ sin una preparación especial para ello, he tenido ocasión de comprobar que esa distinción figura entre aquellas ante las que los bebés norteamericanos (y es de presumir que también los japoneses) presentan una sensibilidad innata. De modo similar, la investigación realizada por Janet F. Werker, de la Universidad de Dalhousie, Nueva Escocia, y Richard C. Tees, de la Universidad de Columbia Británica, demostraron que un grupo de niños de seis a ocho meses de edad pertenecientes a un entorno angloparlante distinguía contrastes fonémicos en indi y salish, una lengua de los indios norteamericanos. Al someterles a la misma prueba a la edad de 12 meses, esos mismos niños, como los adultos angloparlantes, no detectaban los contrastes a los que anteriormente habían sido sensibles.

Resulta conocido el declive de las capacidades perceptivas por exposición a un entorno restringido. Cuando se crían gatitos obligándoles a llevar puestas unas anteojeras que limitan el campo visual de uno de sus ojos a una serie de bandas horizontales y, el del otro ojo, a bandas verticales, las áreas correspondientes de la corteza visual pierden sensibilidad a las bandas dirigi-



6. DESAPARICION DE CAPACIDADES PERCEPTIVAS NO UTILIZADAS. Se comprueba en las respuestas de bebés procedentes de un medio angloparlante ante contrastes lingüísticos ajenos al idioma inglés. Cuando Janet F. Werker, de la Universidad de Dalhousie, Nueva Escocia, y Richard C. Tees, de la Universidad de Columbia Británica, sometieron a prueba simultáneamente a bebés pertenecientes a grupos de distintas edades, la proporción que respondía a contrastes consonánticos correspondientes al indi y al salish, una lengua de los indios norteamericanos, descendía rápidamente con la edad. Los bebés indis y salish de un año, en cambio, mantenían la capacidad de percibir los contrastes de sus respectivas lenguas.

das en otras direcciones. Tales pérdidas parecen ser irreversibles, sin importar lo variado que sea el entorno posterior del animal. Por el contrario, podemos recuperar al menos parte de nuestra capacidad inicial de detectar la información acústica subyacente a los contrastes fonémicos. Por ejemplo, cuando la información acústica esencial para efectuar distinciones fonémicas en indi y salish se presenta incorporada a sonidos que no pertenecen al habla habitual, los angloparlantes detectan diferencias a las que normalmente son insensibles.

Parece que la restricción del entorno lingüístico que supone la lengua nativa no inactiva los mecanismos perceptivos que no se usan. Aprendemos a escuchar las distinciones acústicas del habla relativas a contrastes fonémicos de nuestra propia lengua. Sin embargo, dada la tarea o las instrucciones correctas, podemos detectar distinciones acústicas poco familiares aun cuando no las percibamos como indicadores de contrastes fonémicos. Más aún, alcanzada la suficiente experiencia, la percepción de distinciones no nativas empieza a operar en el nivel fonémico: tras una considerable experiencia con el inglés hablado, los nativos de habla japonesa distinguen los fonemas /r/ y /l/ categóricamente y casi con la misma precisión que los propios angloparlantes nativos. La constatación de que los mecanismos perceptivos a los que tenemos acceso durante la primera infancia continúen operando en la edad adulta, tras un prolongado desuso, se opone a la hipótesis de que la experiencia temprana en materia de lenguaje altera inmutablemente algunos de los mecanismos de percepción del habla.

Ello no obstante, la demostración más drástica de los mecanismos innatos de percepción que otros investigadores y el autor han estudiado tiene lugar en la infancia, cuando el niño empieza a aprender la lengua de sus padres. No se duda ya de que un bebé nace dotado de muchos de los cimientos de sus posteriores percepción y comprensión del habla. Puede que, de igual modo que la anatomía especializada del tracto vocal y los centros del habla del cerebro, esas capacidades perceptivas innatas hayan evolucionado específicamente hacia la percepción y comprensión del habla. Constituyen una respuesta evolutiva a la necesidad de que cada niño adquiera la lengua y cultura de sus padres en una etapa lo más temprana posible de su vida. La eficacia de esos mecanismos se refleja en la rapidez con que los niños se adhieren a la comunidad lingüística.

Ciencia y sociedad

Transporte especial

Las investigaciones encaminadas a la administración de fármacos compuestos de péptidos sintéticos en el tratamiento de enfermedades metabólicas se enfrentan a un obstáculo desalentador: las enzimas del propio organismo degradan prestamente esas moléculas en sus aminoácidos componentes. El efecto terapéutico de una inyección se limita, por tanto, a un tiempo relativamente breve, a menos de una hora muchas veces. Un sistema de transporte de fármacos, que liberara gradualmente las moléculas del péptido, solventaría el problema. Recientes ensayos han renovado el interés por un antiguo candidato: las diminutas esferas de membrana celular artificial denominadas liposomas.

Los primeros liposomas se obtuvieron hace más de dos décadas en el laboratorio de A. D. Bangham, del Instituto de Fisiología Animal de Cambridge, del Consejo Británico de Investigación Agrícola. Bangham y sus colaboradores observaron que, cuando se dispersaban en agua ciertos lípidos (los elementos fundamentales de las membranas biológicas), tendían a formar vesículas cerradas. La mayoría de esas estructuras estaban constituidas por capas dobles de moléculas lipídicas, conformadas en cubiertas esféricas. Según se comprobó posteriormente, la exposición de la solución a ondas sonoras de alta frecuencia reducía el tamaño de las vesículas de lípidos (mímesis de liposomas) a dimensiones microscópicas más uniformes.



Liposoma sometido a criofracturación

Al poco de iniciados los trabajos se observó que los fármacos y otros compuestos con actividad biológica podían quedar atrapados tanto en las bicapas lipídicas como en los espacios acuosos que las separaban. La explotación de esta prometedora técnica se vio obstaculizada, sin embargo, por la ausencia de métodos, económicamente abordables, de producción de liposomas que resultaran, a la vez, estables y capaces de un almacenamiento eficaz. Consecuencia de ello es que los liposomas quedaron como curiosidad de laboratorio, útiles principalmente como modelos de estudio de las membranas biológicas.

Con todo, siguió trabajándose en ellos. En 1981 apareció una nueva firma comercial, Liposome Company, Inc., con el propósito de explotar el creciente cuerpo de conocimientos sobre los liposomas. La compañía centró su atención, de partida, en tres problemas fundamentales del sistema de transporte: el almacenamiento, la estabilidad y la economía. Hace dos años, científicos del laboratorio que esa compañía tiene en Princeton anunciaron el logro de un método de producción de liposomas estables, y de bajo costo, idóneos para encerrar fármacos.

Se ha demostrado, desde entonces, que el nuevo liposoma, compuesto en gran parte por un lípido (lecitina) derivado de la yema de huevo, es capaz, tras su inyección en el músculo, de liberar el fármaco a lo largo de períodos prolongados (de hasta 20 días), a medida que se degradan lentamente sus bicapas lipídicas. A finales del año pasado, Liposome anunció la consecución de un acuerdo a largo plazo, y multimillonario, con el gobierno de la región valona de Bélgica, una empresa belga y la Universidad Católica de Lovaina. El propósito del proyecto conjunto es combinar y mejorar la técnica de dirección intracorporal de fármacos desarrollada por científicos de esa universidad con el sistema de descarga de drogas por medio de liposomas, para tratar la malaria y otras enfermedades que afectan al hígado, verbigracia, hepatomas y hepatitis.

Láser X

Un láser de rayos X podría aumentar la precisión de la espectroscopía por rayos X, generar hologramas de estructuras celulares y moleculares y labrar modelos de circuitos ultrafinos en pastillas de semiconductores. Avances convergentes en su desarrollo anuncian su proximidad.

En el laboratorio nacional Lawrence Livermore de los Estados Unidos, un grupo encabezado pro Dennis L. Matthews ha creado plasmas que generan haces laséricos de rayos X blandos (de larga longitud de onda); otro equipo del laboratorio de física del plasma de Princeton, dirigido por Szymon Suckewer, anuncia logros similares. Simultáneamente, Troy W. Barbee, Jr., de la Universidad de Stanford, ha elaborado espejos que reflejan los rayos X.

Las dificultades que comporta la regulación de la emisión de energía a las longitudes de onda de los rayos X han constituido un serio obstáculo para el desarrollo de ese láser. Para elevar un átomo, o un ion, hasta el nivel de energía necesario para que libere un fotón de rayos X debe "bombeársele" enormes cantidades de energía. Esos átomos se elevan a estados cuánticos tan altos que raramente permanecen en ellos el tiempo suficiente para que se produzca el efecto láser, esto es, se genere una cascada de emisión estimulada en la que los fotones provocan la liberación de otros fotones de igual longitud de onda y fase. Por el contrario, los electrones tienden a relajarse espontáneamente a niveles energéticos inferiores, emitiendo estocásticamente rayos X.

Los científicos del Livermore descubrieron que en el itrio y el selenio podían mantenerse estados cuánticos suficientemente elevados. El láser gigante del laboratorio, Novette, que produce luz visible con una intensidad de hasta 5×10^{13} watt por centímetro cuadrado, aportó la energía necesaria para reducir delgadísimas películas de esos metales en un plasma. Sus impulsos desencadenaron fogonazos dirigidos de rayos X que duraban 250 billonésimas de segundo y que portaban todas las características de la radiación láser.

Los rayos X del plasma de selenio eran unas 700 veces más intensos que las emisiones espontáneas y se situaban en longitudes de onda específicas: 206 y 209 unidades angstrom. El plasma de itrio producía ese efecto a una longitud de onda de 155 angstrom. La intensidad de los pulsos de rayos X crecía exponencialmente en función de la longi-

tud de la columna de plasma, prueba clara del efecto láser.

Empleando un plasma de carbono, generado con impulsos infrarrojos por medio de un láser de dióxido de carbono, el grupo de Princeton ha producido el efecto láser de rayos X con una longitud de onda de 182 angstrom. Si bien se ha visto incapaz de determinar si la amplificación aumenta exponencialmente con la longitud de la columna de plasma.

Los espejos que reflejan rayos X prometen considerables ganancias de intensidad. En los láseres ópticos, por medio de espejos situados en los extremos se refleja el impulso de un lado a otro a través del medio, intensificándose enormemente el haz. No se conocían hasta hace poco espejos de rayos X. Barbee ha ideado ahora superficies formadas por capas de molibdeno, de 35 angstrom de espesor, separadas por capas de 60 angstrom de silicio. Cada capa de molibdeno refleja sólo un escaso número de rayos X incidentes. El resto pasa a la siguiente capa. Dada la precisa separación entre capas, las débiles reflexiones de cada capa se interfieren constructivamente, amplificando el haz reflejado hasta aproximarse a un rendimiento del 70 por ciento.

Potencia enzimática

Los átomos de zinc son constituyentes esenciales de muchas enzimas que digieren proteínas. ¿Desempeñan funciones estructurales y catalíticas? John M. Prescott, de la Universidad A&M de Texas, Frederick W. Wagner, de la Universidad de Nebraska, y Barton Holmquist y Bert L. Vallee, de Harvard, acaban de descubrir que la sustitución del zinc por otros metales incrementa espectacularmente la actividad de esas enzimas.

Estudiaron una segregada copiosamente por *Aeromonas proteolytica*, bacteria marina. Joseph R. Merkel, de la Universidad Lehigh, aisló la bacteria en su búsqueda de organismos que digirieran la celulosa. Su enzima no digería la celulosa, pero sí hidrolizaba rápidamente las proteínas.

Como era el caso en otras enzimas de ese tipo, la acción de la sustancia parecía depender de la presencia de átomos de zinc. Cuando los investigadores eliminaron todo el zinc de la enzima, salvo un 5 o 6 por ciento, su eficacia decreció hasta esa misma razón. Sin embargo, al sustituir el zinc por cantidades correspondientes de cobre o níquel, la actividad enzimática se multiplicó de seis a 25 veces.

No sabemos todavía a qué atribuir tal efecto. Prescott propone que el material extraño altera la conformación de la molécula, modificando la manera con que interactúa con el sustrato. Quizá se alcance una respuesta más precisa en los estudios de cristalografía por rayos X que están en curso en la Universidad de Alberta.

Dada la ubicuidad de las enzimas que portan zinc en los sistemas biológicos, incluidos los humanos, sería del mayor interés encontrar algún procedimiento que incrementara su función.

La tierra se mueve

Según la teoría de la tectónica de placas, la litosfera (una capa de unos 100 kilómetros de grosor que abarca la corteza terrestre y parte del manto) está dividida en placas rígidas en permanente movimiento. Las placas se alejan de los valles de fractura, donde magma ascendente agrega nueva litosfera a su porción posterior; simultáneamente, a centenares de kilómetros de distancia, el frente o porción anterior de la placa se sumerge suelo adentro, en las regiones de actividad sísmica denominadas zonas de subducción.

Dos cuestiones de importancia cabe plantear a este cuadro. ¿Por qué aparecen casi siempre los valles de fractura, que parten en dos las placas y abren un nuevo océano, en los continentes, y no en océanos ya existentes? ¿Por qué varía la actividad sísmica de una zona de subducción a otra? En un informe enviado al *Journal of Geophysical Research*, geofísicos de las universidades de Princeton y Stanford y del Instituto Internacional de Sismología e Ingeniería de Terremotos del Japón aportan respuestas convincentes.

Gregory E. Vink, W. Jason Morgan y Wu-Ling Zhao integran el equipo de Princeton. Han comprobado que los valles de fractura se abren en los continentes y no en las cuencas oceánicas porque la resistencia a la tensión de la litosfera continental es relativamente baja. Como un emparedado de gelatina, la litosfera continental presenta dos capas fuertes y una zona intermedia débil. Tan extraña estructura aparece porque en las capas externas de la corteza, donde la corteza es frágil, la tensión crece con la presión, y, por tanto, con la profundidad. A unos 13 kilómetros de profundidad, la situación cambia de una forma brusca: la alta temperatura ablanda la roca y su tensión decrece rápidamente.

Por debajo de esa zona débil, en la base de la corteza continental, a unos 30 kilómetros de profundidad, la composición de la roca se altera; es ya la característica del manto superior. Puesto que la roca del manto se mantiene frágil y rígida incluso a las temperaturas que se dan en esa región, la tensión litosférica crece de nuevo.

En la litosfera oceánica, la transición a roca del manto ocurre a profundidades mucho más someras, en general de cinco a 10 kilómetros. De ahí que la litosfera oceánica carezca de aquella capa débil intermedia y que aumente su tensión, sin solución de continuidad, hasta una profundidad de 30 a 45 kilómetros.

Al final de su curso, la litosfera generada en un valle de fractura se hunde por debajo de otra placa. El acoplamiento, o unión, entre la placa que subduce y la que queda por encima genera a menudo tensiones que provocan terremotos. Cabría esperar que el acoplamiento, y por tanto la actividad sísmica, guardaran relación con la velocidad a la que las dos placas convergen, pero Eric T. Peterson, de Stanford, y Tetsuzo Seno, del Instituto Internacional de Sismología e Ingeniería de Terremotos, no han hallado esa relación.

Por el contrario, sus datos muestran que, en varias regiones de subducción de una sola placa, la sismicidad es más intensa donde la litosfera que desciende es más joven. Señalan los autores que la litosfera más antigua, que ha tenido más tiempo para enfriarse desde su génesis volcánica, es más densa y por tanto se hunde antes en el manto. El acoplamiento se reduce, hipotetizan, y con él la energía liberada en forma de terremotos.

El sello del impresor

A mediados del siglo XV, Johannes Gensfleisch zur Laden, mejor conocido por Johannes Gutenberg, inventó un método de impresión por medio de tipos móviles de metal. Uno de los componentes de ese salto tecnológico era una tinta aceitosa que, a diferencia de las anteriores preparaciones acuosas, se adhería al metal. Han considerado siempre los historiadores que la tinta de Gutenberg era una mezcla de aceite de linaza y negro de humo, u hollín, fórmula que, según se sabe, era de uso común en el siglo XVI.

Richard N. Schwab y Thomas A. Cahill, de la Universidad de California en Davis, acaban de demostrar que tal suposición estaba equivocada: Gutenber empleó una fórmula excelente, en la que dominaban cobre y plomo. Se hizo el descubrimiento al analizar la

mayoría de las páginas de una copia de la obra maestra de Gutenberg, la Biblia de 42 líneas. En los análisis se expusieron las páginas a un haz de protones generado en un ciclotrón. Los protones energéticos excitaban las moléculas de la tinta, provocando su fluorescencia en la gama de los rayos X; cada elemento emite un espectro característico, constituyendo la intensidad de la radiación una medida de la abundancia del elemento.

El empleo de metales en lugar de hollín para la pigmentación probablemente se inspirara en la pintura al óleo. Explica por qué las impresiones de Gutenberg se mantienen aún brillantes y negras cinco siglos después, mientras que muchas obras posteriores muestran un aspecto apagado. Los óxidos de cobre y plomo son estables; el carbono del hollín, en cambio, se oxida a monóxido de carbono y se desvanece.

La tinta de Gutenberg, y ello constituye un dato de la mayor importancia, difiere de la empleada por los impresores de su tiempo. Constituye, por tanto, una firma química que ayudará a dilucidar viejas disputas sobre la atribución de algunas obras de aquel período. Ha constatado el grupo de Davis que la tinta del buscado ejemplar de la Biblia de 36 líneas también es rica en cobre y plomo, como lo es la del *Sibyllenbuch*, un fragmento temprano. El *Catholicon*, obra posterior atribuida a Gutenberg por algunos expertos, no lleva su marca metálica.

Tampoco la llevan algunas páginas de la propia Biblia de 42 líneas. Muchas de las 48 copias catalogadas contienen páginas "variantes", impresas con planchas reconstruidas cuando la demanda popular generalizó la impresión. Schwab y Cahill han comprobado que la tinta de algunas de esas páginas contiene menos cobre y plomo. El hallazgo pudiera probar el final de la carrera de Gutenberg. A finales de 1455, quizás antes de la elaboración de la Biblia, perdió el control de su imprenta en un proceso abierto por un promotor financiero. Obligado a retirarse, puede que Gutenberg se llevara consigo el secreto de su tinta.

Hacia la síntesis del factor VIII

Las víctimas de la hemofilia clásica (la de tipo *A*) sangran porque carecen de una proteína fundamental, el factor VIII, implicada en la compleja cadena de reacciones en cascada que desembocan en la coagulación. La administración profiláctica de un concentrado de plasma enriquecido en ese factor compensa la deficiencia. El tratamiento conlleva ciertos riesgos. Puesto que el plasma se obtiene a partir de gran número de donantes, puede contaminarse con virus acarreados en la sangre, incluidos los agentes de la hepatitis y del SIDA.

Dos compañías dedicadas a la biotecnología, Genentech y Genetics Institu-

te, han logrado clonar el gen del factor VIII, introducirlo en células de mamífero de un cultivo de laboratorio y que las células sinteticen factor VIII dotado de actividad biológica. En pocos años podrá disponerse, para el tratamiento de la hemofilia, de un factor VIII puro elaborado industrialmente por células de cultivo.

Richard M. Lawn y Gordon A. Vehar dirigían el grupo de Genentech; John J. Toole y Rodney M. Hewick, el de Genetics Institute. Ambos grupos presentan sus trabajos en *Nature*.

En las técnicas de ADN recombinante, el primer paso hacia la elaboración de una proteína suele consistir en la recogida de moléculas de ARN mensajero (ARNm): el ácido nucleico que lleva el mensaje genético desde el ADN de los genes hasta los ribosomas, donde se ensamblan los aminoácidos en proteína. Se copia luego ese ARNm para obtener ADN complementario, ADNc, gen artificial que dirigirá la síntesis de la proteína deseada en células bacterianas o de levadura.

No pudieron aplicar esa técnica los científicos de las mencionadas compañías, pues el factor VIII es extraordinariamente escaso, y cuesta demasiado encontrar su ARNm. De modo que ambos grupos decidieron partir de la purificación de la propia proteína del factor VIII. Determinaron porciones de su secuencia de aminoácidos, de las que, por traducción inversa, dedujeron las breves secuencias de ADN correspondientes. Ensamblando los nucleótidos (subunidades del ADN) adecuados, obtuvieron esos fragmentos en ADN. Valiéndose de esas breves secuencias, que emplearon a modo de sondas, localizaron las porciones correspondientes del extremadamente largo gen del factor VIII.

Sin embargo, para ensamblar la región codificadora del gen completo, los dos grupos necesitaban más cantidad de ARNm intacto del factor. En la búsqueda podían ayudarse de las piezas del gen verdadero de que ya disponían. El grupo de Genentech obtuvo el ARNm de una línea de células *T* humanas; el de Genetics Institute empleó células hepáticas humanas. Ambos copiaron el ARNm en ADNc que codificaba el factor VIII; combinaron ese ADNc con un "promotor" vírico y lo insertaron en un plásmido (pequeño anillo de ADN).

Los dos equipos introdujeron el plásmido recombinante en células de mamífero (de riñón de hámster o de mono), que, se supuso, habrían de contener las enzimas adecuadas para la lectura del gen y la elaboración de las proteínas. En efecto, las células expresaron el gen, produciendo una proteína que se comportaba como el factor VIII en diversos ensayos de laboratorio y que reducía el tiempo de coagulación del plasma obtenido de pacientes hemofílicos. Antes de un año habrán de dar comienzo los ensayos en animales de experimentación.

Enfermedad de Alzheimer

Cada año, causa la demencia y una muerte lenta en centenares de miles de personas. Nadie conoce su origen o cómo detener su curso. Los investigadores centran su atención en seis modelos de la enfermedad

Richard J. Wurtman

Cada año, cientos de miles de ciudadanos comienzan a perder su capacidad para recordar si han apagado la estufa o cerrado la puerta de casa. Se les hace difícil nombrar los objetos familiares, encontrar la palabra adecuada o hacer el saldo de un talonario de cheques. Su aspecto es saludable y no presentan signos de déficit neurológico evidente ni depresión grave, de accidente vascular cerebral, tumor cerebral o ningún otro específico que pueda dar lugar a tales síntomas. Sin embargo, se hallan muy enfermos. De tres a 10 años después estarán gravemente demenciados, es decir, privados de su razón. Serán incapaces de hablar, pensar o cuidar de sí mismos, y con el tiempo fallecerán de alguna complicación de las que afectan a los enfermos encamados.

La mayoría de esos individuos son ancianos, pero sus síntomas no son el resultado del propio envejecimiento. Padecen la enfermedad de Alzheimer. En vida del paciente, el diagnóstico es sólo hipotético: no se ha logrado establecer un patrón propio de anomalías del comportamiento y no se conocen análisis de laboratorio satisfactorios, aparte de una biopsia del cerebro. Sin embargo, en la autopsia aparecen lesiones cerebrales muy características.

Se advierte una pérdida de neuronas (células nerviosas), especialmente en las regiones esenciales para la memoria y el conocimiento o los procesos del razonamiento. Se observa una acumulación de filamentos helicoidales (ovillos o madejas neurofibrilares), y otras estructuras anormales, en el interior de las neuronas. Se distinguen igualmente agregados amorfos de proteínas (amiloides) adyacentes y en la pared de los vasos sanguíneos, así como focos diseminados de restos celulares y amiloides llamados placas neuríticas. (Estas lesiones pueden encontrarse también en el cerebro de ancianos no demenciados, pero en éstos no se observan todas las lesiones a la vez, ni son tan abundantes.) Todo ello, acompañado de una pérdida significativa de neuronas en algunas regiones más primitivas de la base del cerebro, con la consiguiente reducción de la cantidad de neurotransmisores (mensajeros químicos), especialmente de acetilcolina, que se liberan de las terminales de estas neuronas en centros cerebrales superiores.

¿A qué se debe que una enfermedad tan devastadora haya atraído apenas la atención de los médicos y que no se conociera su presencia? Para la ciencia médica, una enfermedad es una entidad clínica y patológica: un conjunto característico, y habitualmente progresivo, de cambios en el aspecto y en la función del organismo del enfermo, así como en la estructura microscópica o macroscópica de los tejidos y órganos afectados. En 1907 el neurólogo alemán Alois Alzheimer reconoció esta enfermedad como una entidad clínica y patológica específica que parecía afectar a unas pocas personas de 40 a 60 años de edad.

Durante mucho tiempo, la enfermedad llamada de Alzheimer se consideró una demencia específicamente presenil; los ancianos con síntomas comparables se decía que padecían de "senilidad" o "endurecimiento de las arterias". Se ha comprobado en los últimos años que el cerebro de la mayoría de los ancianos con demencia muestra, al examinarlos en la autopsia, todas las lesiones características de la enfermedad de Alzheimer. Es más, la abundancia de tales lesiones se correlaciona con el grado de deterioro mental. Se estima que la enfermedad de Alzheimer afecta de uno y medio a dos millones de norteamericanos y que por lo menos 100.000 mueren de esa enfermedad cada año. No se conoce cuál es la causa de ese mal, cómo aparecen sus lesiones características ni cómo tratarlo.

¿Qué camino va de la mera descripción de la enfermedad a su desentrañamiento y terapéutica a seguir? Una manera de entrar en la cuestión es proponer modelos teóricos basados en los síntomas, en los hallazgos patológicos y en los procesos que podrían dar lugar a los mismos. Se someten luego a prueba todos los modelos, eliminándolos o redefiniéndolos hasta quedar establecida su validez, habitualmente por su capacidad para predecir un tratamiento eficaz. Seis modelos se barajan hoy en la investigación sobre la enfermedad de Alzheimer. Arrancan de un número idéntico de hipótesis que pretenden explicar la pérdida de las neuronas.

Una de las hipótesis parte de la observación según la cual el neurotransmisor acetilcolina parece hallarse en menor cantidad en el cerebro de los afectados; sugiere explicaciones para la pérdida selectiva de las neuronas de cuyas terminales se libera la acetilcolina. Las otras hipótesis son más generales. Proponen, respectivamente, que la muerte de las neuronas se debe a la presencia de genes defectuosos, a una acumulación anormal de proteínas, a un agente infeccioso, a un tóxico ambiental o a un metabolismo energético y flujo sanguíneo inadecuados. Cada modelo se apoya en datos de la experiencia o de la investigación y todos parecen contradecirse con contraejemplos; los consideraremos todos, dejando para el último lugar el de la acetilcolina, que ha despertado el mayor interés y en el que se apoyan la mayoría de los esfuerzos terapéuticos.

Modelo genético

En algunas familias, la incidencia de la enfermedad de Alzheimer es llamativamente elevada; este hecho, por sí solo, constituye una prueba sólida en favor de la intervención de algún factor hereditario, por lo menos en algunas

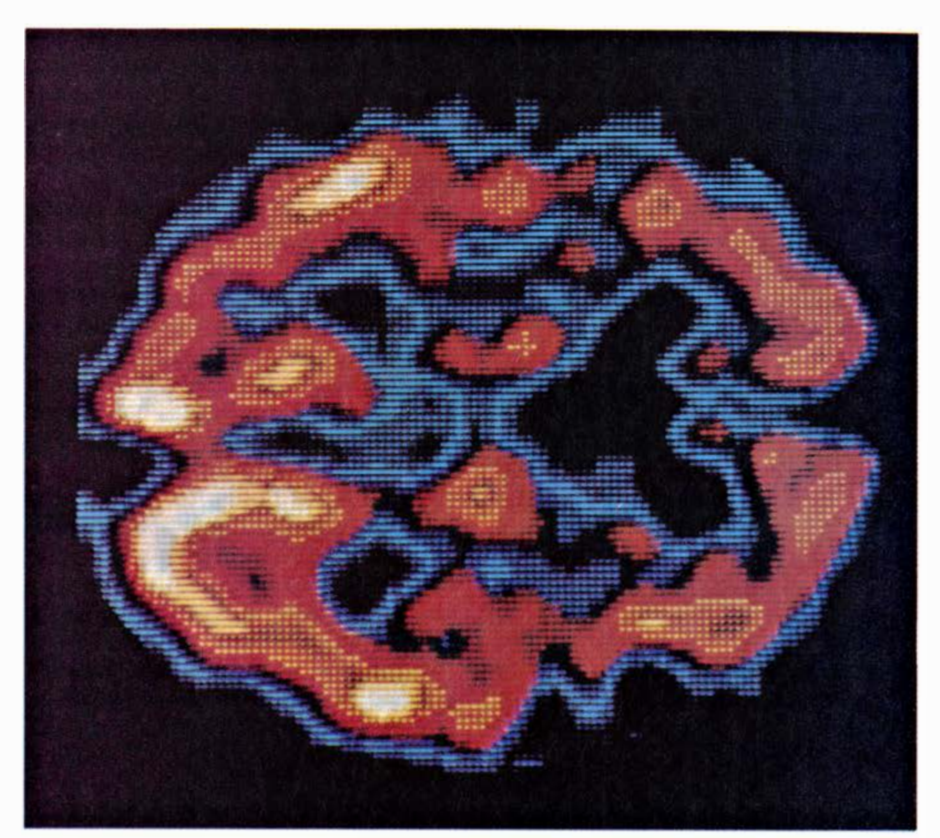
formas de la enfermedad. ¿Se trata de uno o más genes defectuosos? ¿Acaso alguna peculiaridad de la dotación genética convierte al sujeto en vulnerable ante cierto factor ambiental?

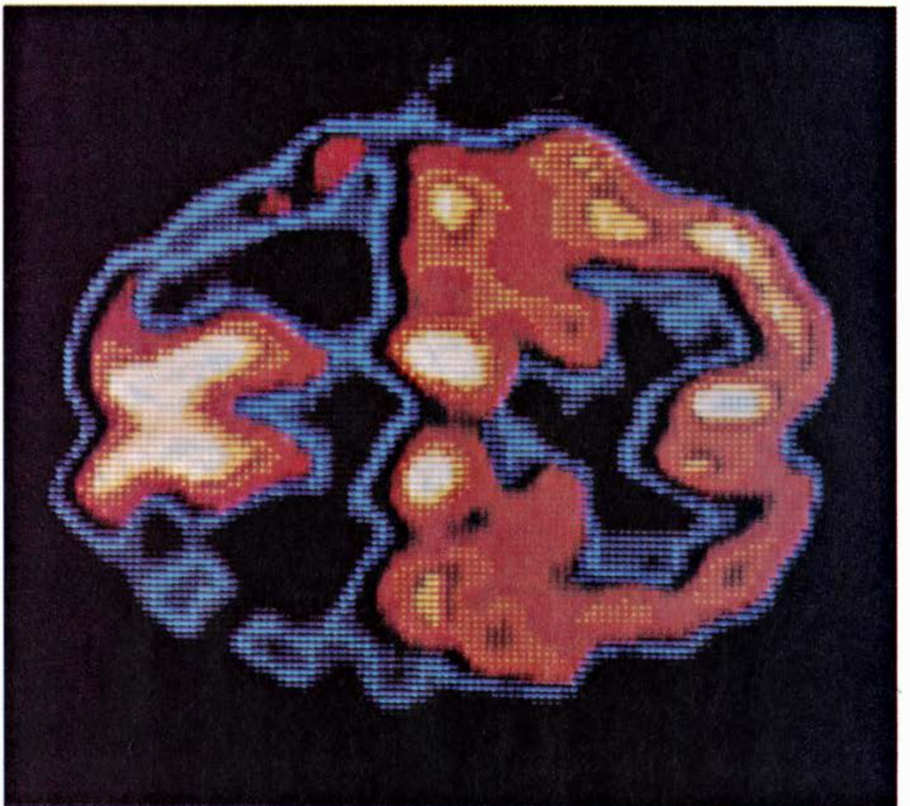
Toda enfermedad genética típica nace de un error congénito del metabolismo: una anomalía del material genético, el ADN, entorpece la capacidad de las células para producir determinada proteína. Si esa proteína es una enzima, a menudo se identifica el defecto advirtiendo que la sustancia cuya conversión cataliza habitualmente la enzima se encuentra en exceso (por no haberse dado la conversión) y el producto habitual de la reacción se presenta en una proporción correspondientemente disminuida. La enfermedad genética también se manifiesta a veces como una anormalidad cromosómica; es el caso del síndrome de Down, o mongolismo.

Si el defecto enzimático es grave, las anomalías clínicas y metabólicas suelen manifestarse ya desde el nacimiento. Sin embargo, se conocen algunas enfermedades de origen genético que "cursan en silencio" durante las primeras décadas de la vida. Así, la enfermedad de Huntington, que se manifiesta en forma de movimientos anormales, demencia progresiva y pérdida de ciertos grupos de neuronas del cerebro, se expresa clínicamente cumplidos ya los 40 años. ¿Cómo puede un error genético, presente, por definición, desde el momento de la concepción, persistir sin revelarse hasta después de tanto tiempo?

Quizá se deba a que el envejecimiento compromete aún más algunos sistemas fisiológicos de por sí genéticamente peor dotados, como el sistema inmunológico. O tal vez empeore un déficit anterior en la producción de alguna proteína esencial (por ejemplo un factor de crecimiento que sustente las neuronas colinérgicas). En ambos casos, debería poder identificarse una proteína genéticamente deficitaria en el cerebro de miembros de las familias con una alta incidencia de la enfermedad, y habría que comprobar que el defecto empeora con la edad.

Se han identificado familias en las que 10 o más miembros, de cuatro o cinco generaciones distintas, han desarrollado una demencia del tipo de Alzheimer. En tales casos parece advertirse la transmisión de un gen aberrante en forma de rasgo autosómico dominante: un gen que afecta a ambos sexos por igual y que basta heredarlo de uno de los progenitores para que su efecto se ejerza de forma absoluta. Los estudios en gran escala de los árboles ge-





1. EL FLUJO SANGUINEO CEREBRAL disminuye en la enfermedad de Alzheimer, como se aprecia al comparar las imágenes de un cerebro normal (*arriba*) y el de un paciente con ese mal (*abajo*). Las imágenes, coloreadas artificialmente, muestran una sección horizontal del cerebro en el nivel de los ojos. Las áreas amarillas y rojas son las de mayor circulación de sangre. En el córtex temporo-parietal (*izquierda*), una región implicada en las funciones cerebrales superiores, el flujo sanguíneo aparece marcadamente reducido en el paciente con enfermedad de Alzheimer. Las imágenes las obtuvieron B. Leonard Holman y Thomas C. Hill, de la Facultad de Medicina de Harvard, aplicando la técnica denominada tomografía de emisión de fotones, en la que se inyecta intravenosamente una molécula marcada con un isótopo radiactivo de iodo. El iodo emite fotones de radiación gamma, que se detectan mediante sondas colocadas alrededor de la cabeza del enfermo; las señales las procesa un ordenador, que reproduce la imagen.

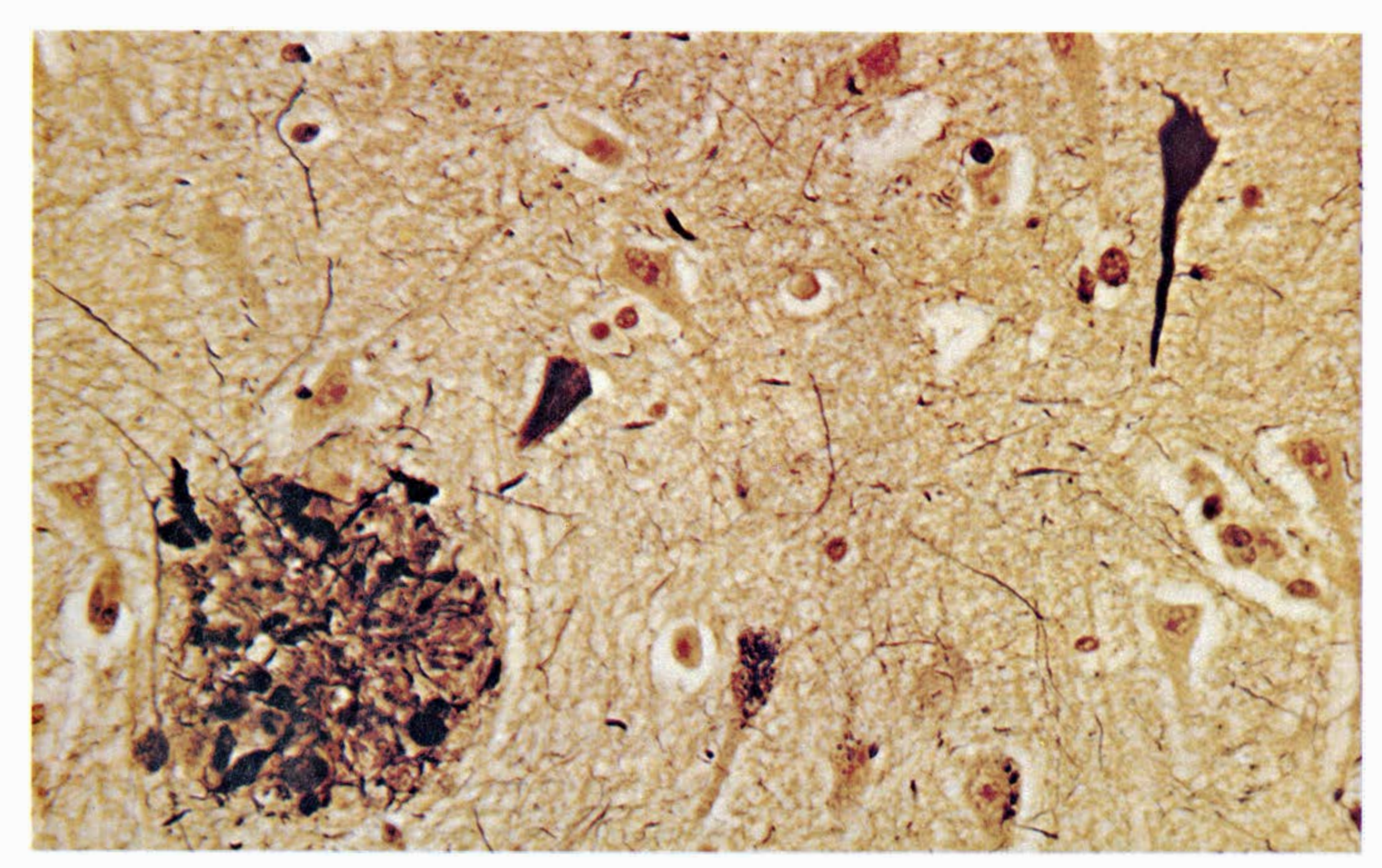
nealógicos pueden identificar un componente genético incluso en familias en las que la enfermedad parece ser sólo esporádica. En un estudio de este tipo, Leonard L. Heston, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, recogió información, a veces por examen directo, de los padres, descendientes y parientes en segundo grado de 125 enfermos de distintas familias que fallecieron en hospitales o asilos de Minnesota entre 1952 y 1972, y que mostraron en la autopsia datos adecuados para el diagnóstico de enfermedad de Alzheimer. Hasta 1981, 87 de los parientes habían desarrollado una demencia; en todos los casos sometidos a autopsia, la demencia se diagnosticó como enfermedad de Alzheimer.

Es de notar que todos esos casos se encontraron entre los parientes de 51 de los 125 sujetos originales, señal de que alrededor del 40 por ciento de los enfermos originales padecían una enfermedad familiar. Quizá portaran un gen causante de una variante de la enfermedad; la enfermedad de Alzheimer esté gobernada por varios genes; de ser así, quizá un gen transportado por los 51 enfermos incrementó la posibilidad de que se expresaran otro o más genes ampliamente difundidos y responsables de una variante no familiar. En otro estudio, J. C. S. Breitner y Marshal F. Folstein, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, examinaron el papel de los factores genéticos en los casos que clasificaron como moderados o graves. El análisis de sus datos les llevó a concluir que había dos formas distintas de enfermedad de Alzheimer: una relativamente moderada y no familiar, que afecta a individuos muy ancianos, y otra variante, transmitida genéticamente, que es responsable de unas tres cuartas partes de todos los casos. Calcularon que, para quien tenga un progenitor o hermano afectado, el riesgo de desarrollar la enfermedad hacia la edad de 80 años se cifra en torno al 17 por ciento.

Además de esas pruebas epidemiológicas, el modelo genético se apoya en este otro hecho: casi todos los individuos con síndrome de Down, trastorno genético bien estudiado, desarrollan la enfermedad de Alzheimer hacia la edad de 40 años. Se le objeta, empero, al modelo, que nadie ha identificado hasta ahora ninguna proteína de función anormal, ni cromosoma anormal alguno, en la enfermedad de Alzheimer.

Modelo de la proteína anormal

Sea lo que fuere, la enfermedad de Alzheimer está claramente asociada con proteínas de estructura anormal. Sus tres signos patológicos principales son los ovillos neurofibrilares del interior de las neuronas, el amiloide que rodea e invade los vasos sanguíneos del cerebro y las placas ricas en amiloide que remplazan las terminales nerviosas degeneradas. Cada uno de esos signos refleja una desacostumbrada acumulación de proteínas en el cerebro. ¿Constituyen los ovillos neurofibrilares y el amiloide meros acúmulos inhabituales de proteínas normales? ¿O, por el contrario, esas proteínas son cualitativamente anormales y sus secuencias de aminoácidos (las subunidades de las proteínas) difieren de las que se encuentran en las proteínas normales del cerebro?



2. ESTRUCTURAS PROTEICAS ANORMALES observadas en la autopsia y que establecen claramente el diagnóstico de enfermedad de Alzheimer. Dos de esos signos neuropatológicos, una placa neurítica (o placa senil) y los ovillos neurofibrilares, se distinguen en la microfotografía, de Daniel P. Perl, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Vermont. Se trata de una tinción argéntica del hipocampo ampliada unas 200 veces. La estructura circular grande situada abajo, a la izquierda, es una placa neurítica: una agrupación de fibras nerviosas degeneradas, entremezcladas con agregados de las proteínas anormales denominados, en su conjunto, amiloide. Las estructuras oscuras, dispersas y triangulares son neuronas cuyo citoplasma está lleno de ovillos neurofibrilares, compuestos de bandas de fibrillas amiloides. Estos rasgos, en menor abundancia, se dan también en ancianos no demenciados.

Si las proteínas son anormales, ¿qué cabe deducir de su origen? ¿Está dirigida su síntesis por un gen anormal? ¿Se hallan codificados los precursores de las proteínas por genes normales y sufren luego modificaciones anormales, quizá por acción de una enzima defectuosa o inadecuadamente activada (tal vez por una toxina ambiental)? ¿Provocan pérdida de neuronas las proteínas, bien porque resultan tóxicas para esas células o porque las comprimen? ¿Podrían esas proteínas actuar de agentes infecciosos que provocan la enfermedad? ¿Acaso los acúmulos de proteínas no están relacionados con el proceso que destruye las neuronas, sea éste cual fuere? ¿Se limita su presencia a indicar que se ha producido la destrucción? Sólo de algunas preguntas comenzamos a atisbar la respuesta. Gracias, en parte, a estudios minuciosos de las propias proteínas.

Los haces de proteínas fibrilares conocidos como ovillos neurofibrilares se encuentran en los cuerpos de las neuronas del hipocampo y del córtex cerebral. Abundan particularmente en las neuronas del tronco cerebral que liberan neurotransmisores (sobre todo acetilcolina) y cuyo número decrece, según se ha visto, en la enfermedad de Alzheimer. Como señaló Alzheimer en 1907, los ovillos absorben las tinciones de plata; ello permite observarlos al microscopio óptico, al principio como bandas oscuras del citoplasma y, más tarde, como grandes masas fibrosas que distorsionan el cuerpo celular. Se resisten a la ruptura enzimática o química y son insolubles en agua, por lo que sobreviven en el tejido cerebral mucho después de que las neuronas donde se formaron hayan muerto.

La microscopía electrónica revela que la mayoría de las fibras que se distinguen en la microfotografía de un ovillo son, en realidad, dos filamentos enrollados en hélice; se les llama filamentos helicoidales dobles, o PHF (por *paired helical filaments*). Las neuronas normales poseen tres tipos de proteínas fibrilares con un papel estructural y de transporte en las células: microtúbulos, microfilamentos y neurofilamentos (también llamados filamentos intermedios). Los estudios de Dennis J. Selkoe, de la Facultad de Medicina de Harvard, y de William W. Schlaepfer, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania, sugieren que los PHF pudieran ser neurofilamentos alterados. La composición en aminoácidos de los neurofilamentos purificados es similar en muchos aspectos a la de los PHF; los anticuerpos monoclonales que se unen a las proteínas de los neurofilamentos también se fijan sobre algunas proteínas de los PHF; la falta de identidad puede explicarla el que hasta ahora las muestras de PHF sólo se han logrado purificar parcialmente.

El término amiloide, esto es, similar al almidón, se aplica a la acumulación patológica, en el interior de los tejidos, de unas masas ricas en proteínas, que destacan sobre todo por sus propiedades tintoriales: cuando el amiloide se tiñe con el colorante rojo congo y se observa con luz polarizada, emite una luminosidad amarillo verdosa. Algo de amiloide se encuentra en el cerebro de muchas personas ancianas, y en otros órganos, como hígado y riñones, de individuos que sufren ciertas enfermedades crónicas. Sin embargo, el hallazgo de abundante amiloide en el cerebro es casi diagnóstico de enfermedad de Alzheimer, en la que aparece en dos for-



3. FIBRILLAS AMILOIDES de los ovillos neurofibrilares. Se muestran como estructuras brillantes, amarillo-verdosas, en forma de llama, en esta microfotografía con luz polarizada de Dennis J. Selkoe, de la Facultad de Medicina de Harvard. Para obtenerla fraccionó el tejido cerebral por centrifugación en gradiente de densidades. La fracción más rica en ovillos se tiñó con el colorante rojo congo. El amiloide es birrefringente: refleja la luz polarizada principalmente en la longitud de onda amarillo verdosa.



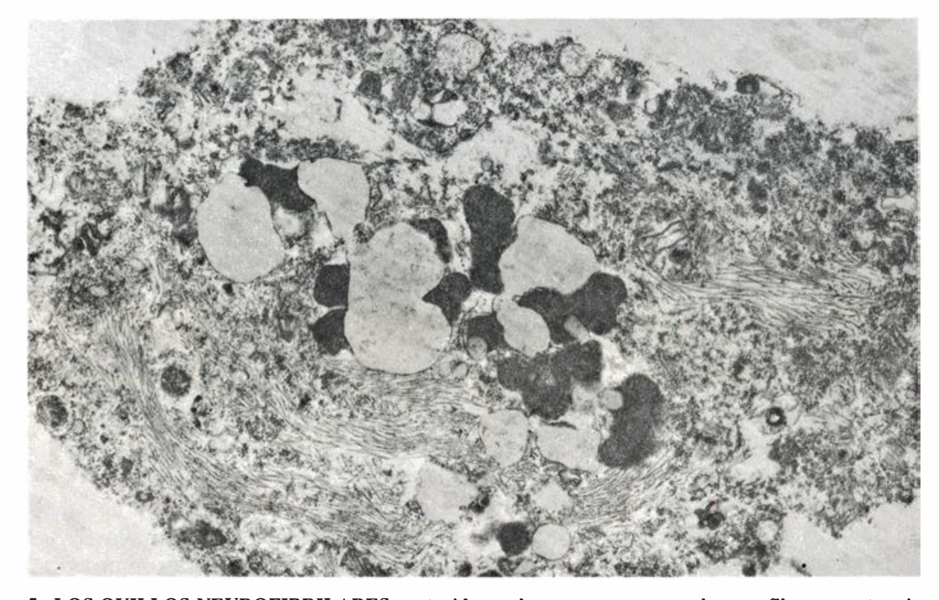
4. AMILOIDE CEREBRO-VASCULAR. Constituye el tercer signo principal de la enfermedad de Alzheimer. En la microfotografía con luz polarizada de los vasos sanguíneos teñidos con rojo congo obtenida por George G. Glenner, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California, se observan los depósitos de fibras amiloides birrefrigentes en las paredes vasculares. El aumento es de 200 diámetros.

mas, mencionadas antes: como depósitos allegados en el interior de los vasos sanguíneos o adyacentes a los mismos y como un componente de las placas neuríticas. (Las proteínas anormales del ovillo neurofibrilar también pueden mostrar las propiedades tintoriales del amiloide.) Aparentemente, la naturaleza de la proteína del amiloide puede variar de acuerdo con el precursor de ésta que se halle presente en un estadio particular de la enfermedad.

El amiloile cerebro-vascular es el hallazgo más común en la enfermedad de Alzheimer. George G. Glenner, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Diego, examinó una serie de 350 cerebros con la enfermedad de Alzheimer y encontró depósitos amiloides en el 92 por ciento de ellos. El amiloide suele comenzar reuniéndose en la capa muscular media de los vasos sanguíneos del cerebro y progresa hacia fuera; a veces remplaza completamente la pared del vaso, debilitándola y provocando hemorragias. Este proceso explica las hemorragias cerebro-vasculares que se registran a veces en los estadios avanzados de la enfermedad de Alzheimer, y que hacen difícil decidir si el enfermo sufre ese mal o la demencia que aparece después de múltiples accidentes vasculares cerebrales de pequeña entidad.

Glenner ha expuesto una teoría para la patogenia de la enfermedad de Alzheimer basada en el amiloide cerebrovascular. Sugiere que ciertas proteínas "amiloidogenéticas" de la sangre del enfermo pueden convertirse en amiloides por acción de una enzima de la pared de los vasos sanguíneos cerebrales. El amiloide lesiona a su vez los vasos, lo que provoca la llegada al tejido cerebral de otras proteínas de la sangre; éstas resultarían tóxicas para las neuronas y activarían una enzima que transforma los neurofilamentos en filamentos helicoidales dobles, que lesionan más aún a las neuronas. En última instancia, las neuronas dañadas, con sus ovillos neurofibrilares, se englobarían en placas neuríticas.

Las placas neuríticas (o seniles) son el tercer miembro de la tríada cuya presencia denuncia la enfermedad de Alzheimer. Habitualmente, las placas son más abundantes en el córtex cerebral, en el hipocampo y en la amígdala, un núcleo de células próximo al hipocampo que parece estar particularmente afectado por la enfermedad. El número de placas tiende a mostrar una estrecha relación con la gravedad de la demencia. En esas áreas, las placas se localizan en las capas que contienen los axones y los terminales de las neuronas, no donde se encuentran los cuerpos celulares. Henryk M. Wisniewski y Robert D. Terry, a la sazón en la Facultad de Medicina Albert Einstein, observaron que, conforme maduraban, las placas sufrían un cambio ordenado de su aspecto. Al principio eran masas esféricas, con diámetros comprendidos entre 50 y 200 micrometros (milésimas de milímetro), formadas de terminales nerviosas degeneradas, amiloide y el tipo de células gliales (las células de soporte del cerebro) que se asocia a las reacciones inflamatorias. Después, el amiloide se acumulaba en un núcleo central, rodeado por los axones degenerados, macrófagos (células "carroñeras") y más glía. Finalmente, los restos celulares desaparecían y dejaban depósitos sueltos de amiloide.



5. LOS OVILLOS NEUROFIBRILARES contenidos en las neuronas se resuelven en fibras en esta microfotografía electrónica de Selkoe. Se trata de una sección ultrafina de una neurona cortical aislada del cerebro de un enfermo, que el microscopio de transmisión ha ampliado unas 10.000 veces. Las fibras atraviesan el citoplasma alrededor de un agregado de granos lipídicos pigmentados llamados lipofucsina.

Además de acumular esos tres tipos de proteínas anormales, el cerebro de los pacientes con enfermedad de Alzheimer parece que sintetiza, en términos generales, menos proteínas. Charles A. Marotta, de la Facultad de Medicina de Harvard, y sus colegas sospechaban que la razón estriba en que el cerebro presenta un déficit de ARN (el ácido nucleico que media la traducción del ADN en la síntesis de proteínas), y ello porque una enzima que degrada el ARN está mal regulada.

Modelo del agente infeccioso

Los pacientes de la enfermedad de Alzheimer suelen ofrecer un aspecto saludable, sin los habituales signos de infección del cerebro (fiebre o la presencia de leucocitos y proteínas en el líquido cefalorraquídeo). ¿Por qué, pues, considerar la posibilidad de un origen infeccioso? Por dos razones: el prurito lumbar (*scrapie*) y la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. La primera es una enfermedad del cerebro lentamente progresiva e inexorablemente fatal extendida entre las cabras y ovejas. La segunda es una enfermedad del cerebro bastante rara (se descubre un caso nuevo cada año por millón de habitantes), que afecta habitualmente a las personas de entre 55 y 75 años; produce una demencia progresiva, trastornos de la postura, de la visión y del control del movimiento; los pacientes mueren un año después del comienzo de la enfermedad.

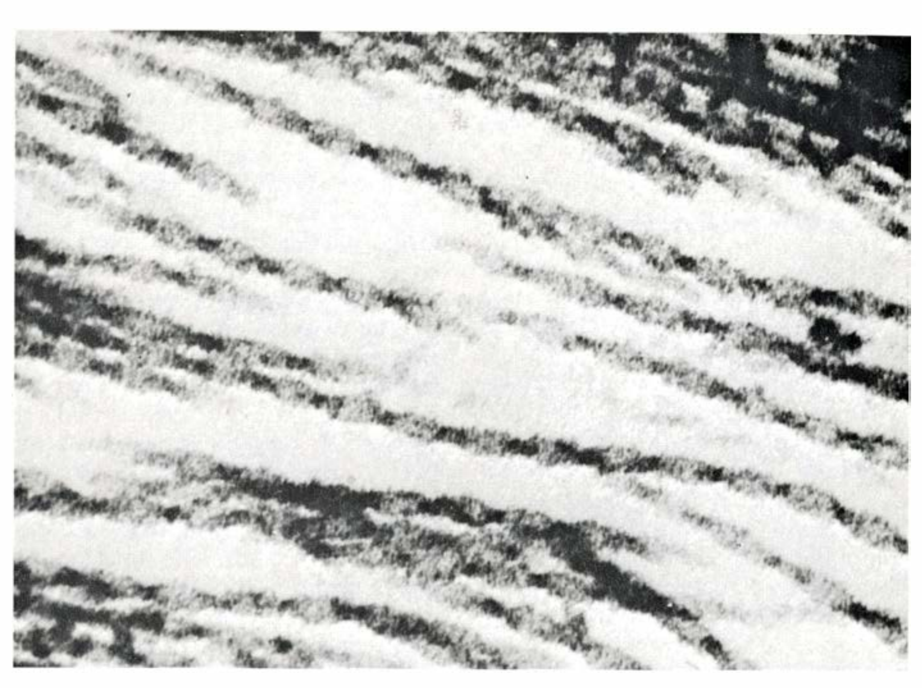
Hace ya algún tiempo se demostró que ambas enfermedades podían transmitirse a los animales (por inyección en el cerebro de extractos de tejido infectado), señal de que quizá las provoque algún agente infeccioso, presumiblemente un virus; el agente causal puede aislarse del cerebro y de otros tejidos. Sin embargo, en ningún caso se han obtenido pruebas de inflamación del cerebro o de trastorno funcional de cualquier órgano. Es más, en ambas enfermedades el período de incubación que transcurre entre la exposición al agente infeccioso y la primera aparición de signos clínicos es notablemente prolongada (aproximadamente una cuarta parte de la vida normal de los animales afectados). En ambos casos se supuso que

el presunto agente infeccioso era un virus no habitual, "lento".

Se considera ahora que los agentes que causan prurito lumbar y la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob pudieran no ser virus, sino un tipo de agente más raro, llamado prión: una partícula proteica que aisló, del cerebro de una oveja con prurito lumbar, Stanley B. Prusiner, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco. [Véase "Priones", por Stanley B. Prusiner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1984.] A diferencia de cualquier otro agente infeccioso conocido, los priones no parecen contener ADN ni ARN. Patricia A. Merz y R. A. Summerville, del Instituto estatal de Nueva York para la Investigación Básica sobre Trastornos del Desarrollo, observaron que las preparaciones altamente purificadas del agente del prurito lumbar portaban múltiples estructuras con forma de bastoncillo; sugirieron que pudieran ser el propio agente infeccioso. Prusiner sostiene que los bastoncillos son agregados de priones. Cuando los bastoncillos se tiñen con rojo congo, se parecen mucho al amiloide que muestran los cerebros de las ovejas con prurito lumbar y los de algunas personas con la enfermedad de Creutzfeldt Jakob. Prusiner sugiere que tal amiloide sería en realidad un agregado de bastoncillos de priones; el amiloide de la enfermedad de Alzheimer sería, igualmente según ese autor, una colección de priones, de modo que éstos constituirían también los agentes de esa enfermedad.

D. Carleton Gajdusek y sus colaboradores, del Instituto Nacional de Enfermedades Neurológicas y de la Comunicación, han observado una estructura anormal de filamentos enrollados en los cerebros de animales con prurito lumbar y de personas con la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob o con kuru. (El kuru es una enfermedad neurológica que afecta a algunas tribus de Nueva Guinea. Precisamente por demostrar la transmisibilidad del kuru y de la de Creutzfeldt-Jakob, Gajdusek recibió el premio Nobel en 1976.) Proponen esos autores que tal estructura filamentosa sería el agente infeccioso de las tres enfermedades. Las estructuras no se presentan en la enfermedd de Alzheimer, pero comparten algunas propiedades inmunológicas con las fibras amiloides y los ovillos neurofibrilares.

Si la enfermedad de Alzheimer está causada por un agente infeccioso, debería ser transmisible, pero los intentos para contagiarla a animales de experimentación han sido infructuosos. Quizá la infección por el agente de esta enfermedad (si lo hay) requiera una dotación genética especial, un trastorno inmunológico asociado o la exposición previa a un tóxico ambiental.



6. FILAMENTOS HELICOIDALES DOBLES. Se identifican al someter un ovillo neurofibrilar a una ampliación superior (de hasta unos 110.000 diámetros en esta microfotografía electrónica, obra, también de Selkoe). Se aprecia aquí que cada fibra está compuesta de dos filamentos, enrollados en hélice.

Modelo tóxico

Sostienen algunos investigadores que hay indicios de que las sales de aluminio contribuyen al desarrollo de la enfermedad de Alzheimer. Tales sales están presentes en el agua potable, pueden añadirse a los alimentos y fármacos (quesos fermentados, antiácidos y aspirinas tamponadas, por ejemplo) y pueden liberarlas los utensilios y botes de aluminio. Daniel P. Perl, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Vermont, ha observado que el aluminio se acumula preferentemente en las neuronas humanas portadoras de ovillos neurofibrilares. Igor H. Klatzo y Wisniewski, a la sazón en el Instituto Nacional de Enfermedades Neurológicas, han constatado que la inyección de sales de aluminio en conejos o en gatos (pero no en ratones, ratas o monos) producía ovillos neurofibrilares. Los ovillos aparecían cuando la concentración de aluminio en el cerebro alcanzaba el nivel que se observa en la enfermedad de Alzheimer, según demostró Donald C. Mclaughlin, de la Universidad de Toronto.

De acuerdo con Allen Alfrey, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado, la demencia irreversible que se observa en algunas personas que han sufrido diálisis renales repetidas con soluciones dialíticas ricas en aluminio se asocia con niveles altos de ese metal en el cerebro. Se sabe que el aluminio inhibe algunas enzimas cerebrales y que sus sales impiden el transporte de ciertas proteínas (incluidos los precursores de los neurofilamentos) desde el cuerpo celular de las neuronas hacia el botón terminal del axón. Gajdusek ha constatado que una demencia observada entre los nativos de ciertas comunidades en Guam va asociada a elevados niveles cerebrales de aluminio; la falta de suficiente calcio en su agua potable parece incrementar la absorción del metal.

Las pruebas que implican al aluminio son discutibles. La asociación de éste con ovillos neurofibrilares puede significar sólo que los ovillos, una vez formados, tengan afinidad para el aluminio. Al contrario que en la enfermedad de Alzheimer, en la que los ovillos neurofibrilares están formados por filamentos helicoidales dobles, los que se producen experimentalmente por aluminio en conejos y gatos los forman filamentos simples y aparecen en zonas no afectadas habitualmente por la enfermedad de Alzheimer. Algunos signos y síntomas de la demencia asociada a diálisis no se dan en la enfermedad de Alzheimer. Aunque el aluminio no

pueda, por sí mismo, provocar quizá los indicadores clínicos y patológicos de la enfermedad, su presencia contribuiría al desarrollo del mal en individuos expuestos a otro factor causal.

Modelo del flujo sanguíneo

No deja de resultar irónico que deba considerarse el flujo sanguíneo entre los factores causales de la enfermedad de Alzheimer. Hasta no hace mucho, la mayoría de las demencias del adulto se achacaban a una "mala circulación" o "endurecimiento de las arterias". Se comprobó luego que tales demencias no se correlacionan habitualmente con aterosclerosis o pequeños ictus, sino con el déficit de acetilcolina y los ovillos, placas y amiloide cerebro-vascular de la enfermedad de Alzheimer. Sin embargo, parece ahora comprobado que esa enfermedad también está, cuando menos, asociada con una reducción profunda de la cantidad de sangre aportada al cerebro, de la cantidad de oxígeno y glucosa extraídos de la sangre y de la energía generada por el oxígeno y la glucosa. Tales observaciones proceden en su mayor parte de los estudios del metabolismo cerebral llevados a cabo con las modernas técnicas no invasivas de obtención de imágenes. En la tomografía de emisión de positrones (TEP), por ejemplo, se trata cierta sustancia química para que emita positrones; al administrarla al enfermo, se determina su distribución en el cerebro mediante análisis por ordenador de los datos obtenidos tras una serie de barridos de detección de positrones.

Richard S. J. Frackowiak y J. M. Gibbs, del Hospital Nacional de Enfermedades Nerviosas de Londres, han observado que, en los individuos normales, el flujo sanguíneo del cerebro desciende aproximadamente en un 23 por ciento entre los 33 y 61 años de edad; el cerebro compensa ese déficit extrayendo más oxígeno de la sangre. En la enfermedad de Alzheimer se produce un descenso aún mayor de la circulación cerebral, pero sin aumento compensatorio de la extracción de oxígeno; tanto el flujo sanguíneo como el consumo de oxígeno decaen hasta un nivel de aproximadamente el 30 por ciento por debajo del de los ancianos no demenciados. Esos niveles descienden más aún conforme la situación clínica se deteriora. Los mayores descensos se detectan en los lóbulos frontales y parietales del córtex cerebral, que también tienden a mostrar las lesiones anatomopatológicas más graves.

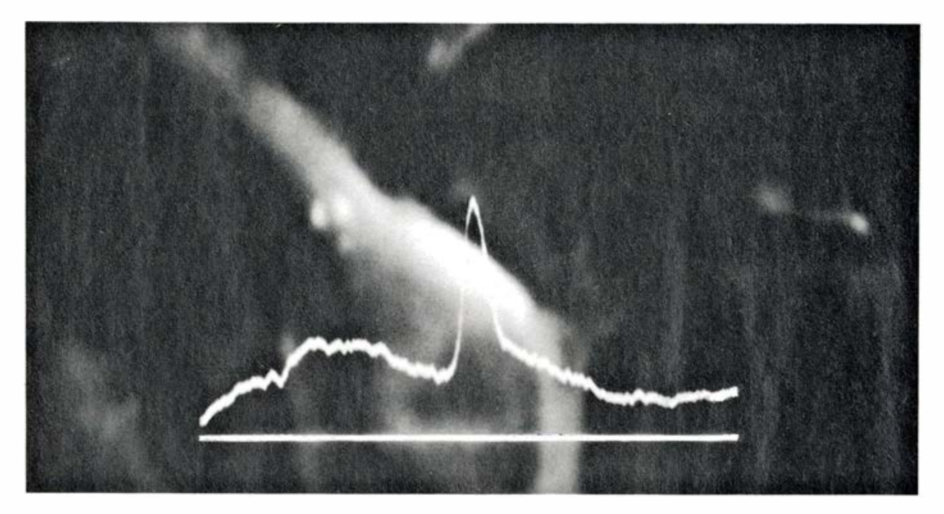
Se aprecia en el cerebro una disminución paralela de la tasa de consumo de glucosa, que es su mayor fuente de energía. D. Frank Benson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles, ha constatado un descenso del consumo de glucosa del 30 al 50 por ciento en las cuatro regiones corticales y una subcortical que ha logrado visualizar; sin embargo, en los enfermos cuya demencia era consecuencia de múltiples ictus de poco alcance, el déficit de consumo de glucosa tendía a restringirse a las regiones afectas por los ictus. John P. Blass, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cornell, ha observado un déficit de fosfofructoquinasa, una enzima necesaria para convertir la glucosa en productos intermedios de alta energía, en las muestras de cerebros y en los cultivos celulares de piel de los pacientes con enfermedad de Alzheimer.

¿Constituye la reducción de la capacidad del cerebro para obtener energía química una causa de la enfermedad que daña las neuronas, o es una consecuencia de la misma? Sin duda cabe esperar que el descenso del número de células que consumen oxígeno y glucosa rebaje la demanda cerebral de sangre. Pero la reducción del flujo sanguíneo que se ha observado parece ser, a menudo, mayor de lo que podría explicar la pérdida de tejido cerebral.

¿Cómo llega a producirse el trastorno del flujo sanguíneo cerebral que se detecta en la enfermedad de Alzheimer? Arnold B. Scheibel, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles, ha observado que las pequeñas neuronas que controlan la dilatación y la contracción de las arterias del cerebro tienden a desaparecer con el envejecimiento normal y son particularmente escasas en el cerebro de los enfermos demenciados. Hace varios años, con mis colegas del Instituto de Tecnología de Massachusetts, encontramos que la liberación del neurotransmisor dopamina controlaba el flujo de sangre a una región rica en dopamina del cerebro de la rata; otros han hallado que los vasos sanguíneos tienen receptores específicos para otros muchos transmisores, lo que induce a pensar que la liberación de esos transmisores pudiera afectar al flujo sanguíneo cerebral regional. Quizá la pérdida de los nervios que controlan el flujo sanguíneo impida la llegada de suficiente sangre a las neuronas.

Modelo de la acetilcolina

En 1976, dos grupos, dirigidos por Peter Davies, de la Universidad de Edimburgo, y por David Bowen, del Instituto de Neurología de Londres, hicieron público el hallazgo de la primera anomalía bioquímica clara asociada con la enfermedad de Alzheimer. Encontraron en el hipocampo y en el córtex cerebral de los enfermos que la enzima colinoacetil transferasa (CAT) presentaba niveles hasta un 90 por ciento inferiores al normal. Esa enzima cataliza la síntesis de acetilcolina a partir de sus precursores, colina y acetil coenzima *A*. La pérdida de la actividad de la CAT refleja la pérdida de las terminales nerviosas colinérgicas que liberan



7. CONCENTRACION DE ALUMINIO en una neurona del cerebro de un paciente con la enfermedad de Alzheimer. Se deduce a partir de esta microfotografía tomada por Perl. La muestra se tiñó con plata, que se acumula en el ovillo neurofibrilar que llena el citoplasma de la célula. La imagen de la figura se obtuvo en dos tiempos: primero por la radiación secundaria de electrones que emitió la muestra al pasar un haz de electrones sobre ella; después, al proyectarse de nuevo el haz por la célula (*línea blanca*) y recoger los rayos X emitidos en la longitud de onda características del aluminio (*curva blanca*); aparece un pico sobre el núcleo. Algunos autores atribuyen efectos tóxicos a esa elevada concentración de aluminio.

acetilcolina en esas dos regiones del cerebro. Marek-Marsel Mesulam, de la Facultad de Medicina de Harvard, y Joseph T. Coyle, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, han encontrado que las terminales que faltan son las que proceden de neuronas cuyos cuerpos celulares están muy lejos, en la porción basal del cerebro anterior, el septum.

Esta grave anomalía bioquímica identificada por Davis y Bowen ha sido confirmada repetidamente por otros investigadores; para muchos de nosotros constituye la pista que con mayor probabilidad apunta hacia la causa de la enfermedad de Alzheimer. También sugiere una explicación para el síntoma cardinal de la enfermedad: la pérdida de memoria. Si los niveles de CAT en el hipocampo son bajos, el nivel de acetilcolina (que no puede medirse en la autopsia) con toda probabilidad debe ser inferior al normal en esa zona. Abundantes datos sugieren que las terminales colinérgicas del hipocampo son de importancia crítica para la formación de la memoria. Por tanto, es plausible emitir la hipótesis de que algunos de los defectos cognitivos de la enfermedad de Alzheimer son resultado directo de la reducción de la neurotransmisión dependiente de la acetilcolina.

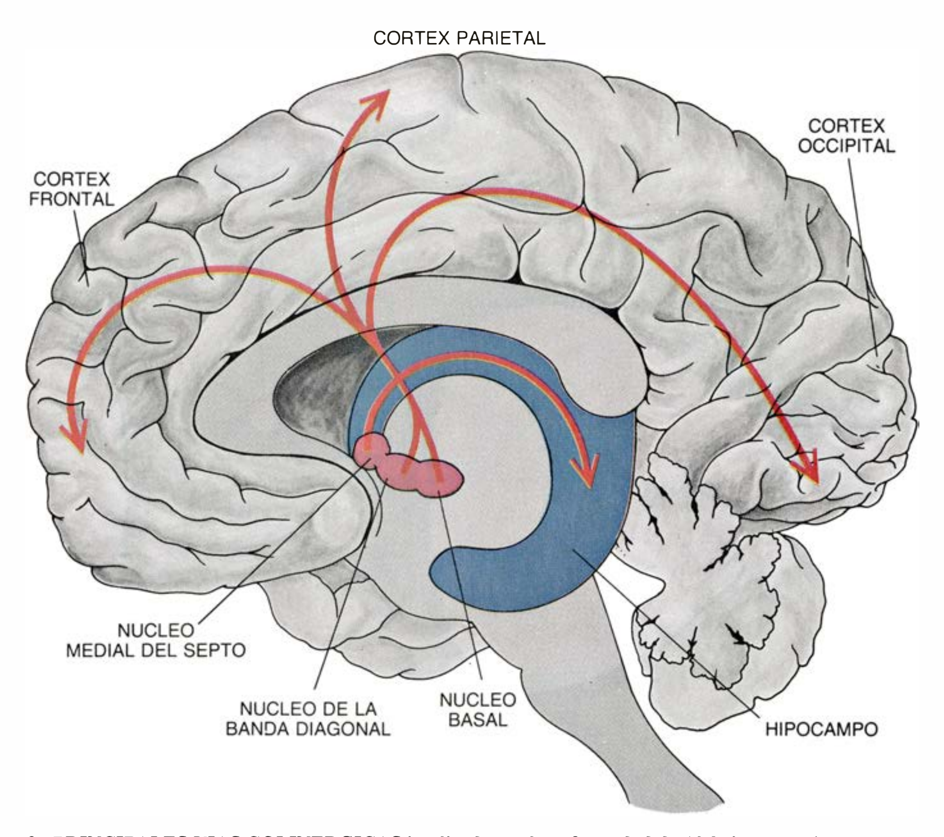
La hipótesis colinérgica sugiere un objetivo para el tratamiento: podría ser eficaz un fármaco que restaure el nivel de acetilcolina, de la misma forma que la L-dopa logra corregir el defecto de neurotransmisión resultante de la pérdida de otro neurotransmisor, la dopamina, en los sujetos que padecen la enfermedad de Parkinson.

Sin embargo, no ha sido fácil encontrar un agente eficaz, seguro e inofensivo que restaure completamente el nivel de acetilcolina o que imite la actividad de la acetilcolina. Un primer tipo de agente podría ser un precursor de la acetilcolina que se convirtiera en el neurotransmisor. Pero el problema es que las terminales que contienen CAT (que habrían de catalizar esa conversión) son las que escasean. Por otro lado, podría restaurarse el nivel de acetilcolina con un fármaco que inhibiera la degradación de acetilcolina; tal fármaco probablemente no sólo actuaría en el hipocampo y el córtex cerebral, sino también en otras partes del cerebro (y en otros órganos) donde tal inhibición sería inaceptable. La misma dificultad surgiría en el caso de los agentes que remedan la acetilcolina.

Para comprender el proceso que ha de seguirse en el desarrollo de un fár-



8. TERMINALES COLINERGICAS, que sintetizan el neurotransmisor acetilcolina y que, por tanto, contienen la enzima colinoacetil transferasa (CAT), identificadas en la microfotografía tomada por Mark-Marsel Mesulam, de la Facultad de Medicina de Harvard. Para destacar esas células se trató una sección del núcleo basal del cerebro de un mono rhesus con un anticuerpo monoclonal que se fija sólo a la CAT. Se sometió la enzima peroxidasa de rábano, previamente unida al anticuerpo, a una reacción cuyo producto tiñó las células colinérgicas. CAT sintetiza acetilcolina a partir de colina y acetil coenzima *A*.



9. PRINCIPALES VIAS COLINERGICAS implicadas en la enfermedad de Alzheimer, según un esquema basado en los hallazgos de Mesulam y Joseph T. Coyle, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, y sus colegas. Los pacientes con enfermedad de Alzheimer presentan un déficit de CAT, y por tanto presumiblemente de acetilcolina, en el córtex y en el hipocampo. Las terminales nerviosas que en circunstancias normales contendrían la CAT pertenecen a las neuronas colinérgicas cuyos cuerpos celulares se ubican en uno de los núcleos de la base del cerebro representados aquí de color rosa.

maco capaz de restaurar el defecto de transmisión colinérgica y que actúe sólo donde tal restauración se desea es preciso considerar el ciclo activo de las moléculas de acetilcolina. Este transmisor se sintetiza principalmente en las terminales desde las cuales se libera. El primer paso de su síntesis es la captación de la colina de la hendidura sináptica, el pequeño espacio que queda entre la terminal de una neurona presináptica (donde el transmisor se libera a la llegada de un impulso nervioso) y la superficie de la neurona postsináptica (donde el transmisor produce su efecto alterando la actividad eléctrica de la neurona receptora). Pueden introducir la colina en la terminal dos proteínas transmisoras de la membrana celular presináptica. Una de ellas la tienen todas las células, no sólo las neuronas colinérgicas, puesto que se necesita colina para la síntesis de fosfatidilcolina, lecitina, un constituyente de todas las membranas celulares. La otra proteína transportadora se encuentra sólo en las terminales colinérgicas, donde su afinidad particularmente elevada para la colina permite a la terminal incorporar casi toda la colina presente en la hendidura sináptica.

El siguiente paso, catalizado por la CAT, combina la colina con el acetil coenzima *A* para producir acetilcolina. Las terminales tienen un exceso de CAT y poca cantidad de los precursores colina y acetil coenzima *A*, de modo que las moléculas de la enzima no están ocupadas en su totalidad; la tasa de síntesis del neurotransmisor no está, por tanto, limitada por la cantidad de la enzima CAT, sino por el nivel de los dos precursores. Una vez sintetizada, las moléculas de acetilcolina se almacenan en la terminal hasta la llegada de un impulso nervioso que descarga algunas a la sinapsis. Ya en la sinapsis, las moléculas de acetilcolina atraviesan la hendidura y actúan sobre un receptor de la neurona postsináptica, transmitiéndose así la señal generada por el impulso nervioso. La enzima acetilcolinesterasa la degrada en colina, aunque también puede interactuar con un receptor de la membrana presináptica generando una señal que modula la liberación subsiguiente de acetilcolina desde la terminal presináptica.

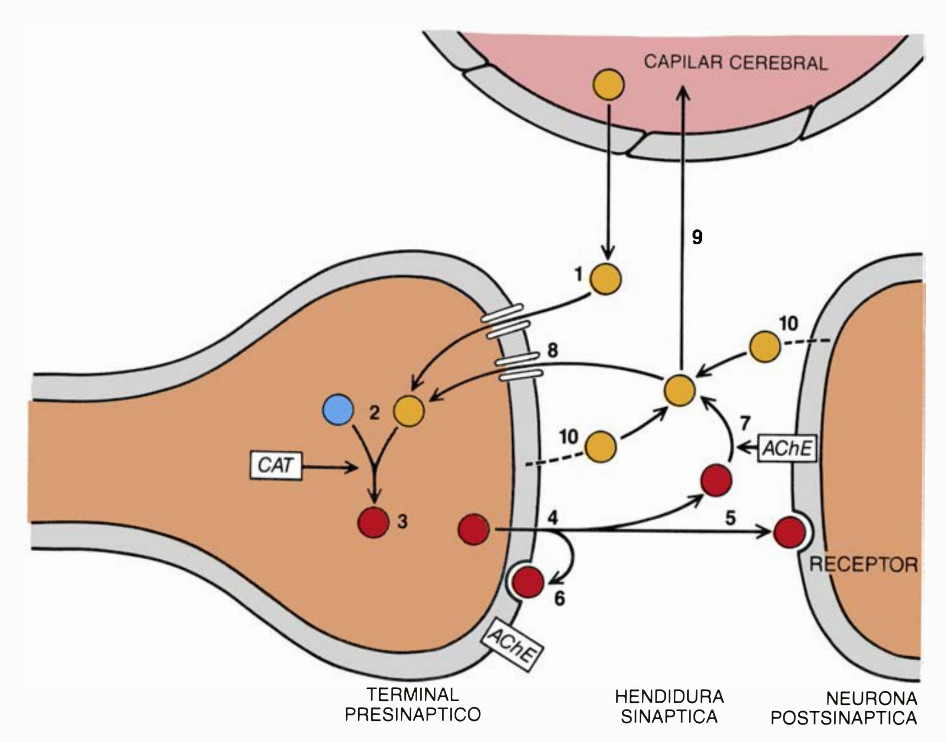
Cada uno de esos pasos del ciclo vital de la molécula proporciona al neurofarmacólogo la oportunidad de encontrar drogas que, bien imiten la acción postsináptica del transmisor deficitario, bien incrementen la cantidad del transmisor liberado desde las restantes terminales colinérgicas hacia la sinapsis. Valdría, por ejemplo, un fármaco que simulara el efecto postsináptico de la acetilcolina, y que actuara así sólo en las regiones donde faltara transmisor. Algunos resultados, muy provisionales, comunicados por Robert E. Harbaugh, del Centro Médico Dartmouth-Hitchcock, sugieren su factibilidad.

Una vía alternativa es incrementar la liberación de acetilcolina. Podría intentarse con un fármaco que bloqueara selectivamente los receptores presinápticos de acetilcolina en las terminales colinérgicas supervivientes. Al faltar la señal reguladora de esos receptores, la terminal liberaría más acetilcolina en cada descarga. También podría hallarse un fármaco que prolongara la actividad de la cantidad disponible de acetilcolina, bloqueando su enzima degradante, la acetilcolinesterasa, y ello sólo donde el transmisor se hallara en déficit.

Quizá la estrategia más obvia sea incrementar la síntesis de acetilcolina en las terminales supervivientes proporcionando más colina a la enzima CAT. Ocurre que la CAT responde más al incremento de colina cuando la neurona que la contiene descarga a menudo que cuando la neurona está en reposo. Las neuronas colinérgicas tienden a descargar más a menudo en las regiones donde la liberación de acetilcolina es deficitaria. Por tanto, cabe esperar que el suplemento de colina dado a un paciente ejerza un efecto selectivo en las regiones con déficit de acetilcolina: precisamente donde se desea tal efecto.

En mi laboratorio hemos administrado a voluntarios sanos un suplemento de colina (o lecitina, que el organismo degrada a colina). La concentración de colina en su sangre alcanzó los niveles que en las ratas son suficientes para incrementar el nivel de colina en el cerebro, y con ello aumentar la liberación de acetilcolina por parte de las neuronas que descargan a menudo. John H. Growdon, de la Facultad de Medicina de Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, encontró que este tratamiento incrementaba también el nivel de colina en el líquido cefalorraquídeo, lo que es señal de que la colina suplementaria ha tenido acceso al cerebro.

En 1978 y 1979, en primeras comunicaciones, se describió una mejoría intelectual de unos pocos enfermos tratados (habitualmente con lecitina impura) durante períodos breves, mejora que no pudo confirmarse al tra-



10. MOVIMIENTOS Y METABOLISMO de la molécula de acetilcolina. La colina (*1*) liberada a la hendidura sináptica desde la sangre entra en una terminal colinérgica presináptica donde la CAT la combina con acetil coenzima *A* (*2*) para formar acetilcolina (*3*). Cuando la llegada de un impulso nervioso despolariza la neurona se libera acetilcolina (*4*), que atraviesa la sinapsis para interactuar con un receptor de la neurona postsináptica, produciéndose la transmisión de la señal generada por el impulso nervioso (*5*). La acetilcolina puede, por otra parte, interactuar con un receptor de la membrana presináptica (*6*), modulando la liberación subsiguiente de acetilcolina. O bien puede degradar la acetilcolinesterasa (*AChE*), obteniéndose colina (*7*), que capta la terminal (*8*) o va a la sangre (*9*). La degradación de la fosfatidilcolina (lecitina), constituyente de membranas celulares, contribuye a proporcionar colina (*10*).

tar a los pacientes durante unas pocas semanas en condiciones controladas. Actualmente se trabaja en ver si un tratamiento prolongado (al menos por un período en el que los pacientes de control no tratados muestren un deterioro cuantificable) mejora las conductas alteradas por la enfermedad de Alzheimer o, cuando menos, retrasa el deterioro.

Ha concluido recientemente el único estudio a largo plazo, controlado cuidadosamente, del efecto de un suplemento de lecitina purificada. Raymond Levy, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Londres, ha tratado a 24 pacientes con enfermedad de Alzheimer, observando en ocho una mejoría persistente de la conducta. La edad media de éstos era de 79 años, mientras la edad media de los que no respondieron era de 69. ¿Acaso los pacientes que respondieron tenían lesiones cerebrales incompletas y quizá limitadas a las neuronas colinérgicas? Varias pruebas sugieren que existe más de una forma de enfermedad de Alzheimer; en concreto, los individuos que desarrollan la enfermedad a edad más avanzada tienden a sufrir una forma moderada, cuyos efectos se limitan fundamentalmente a las neuronas colinérgicas.

La reducción selectiva de la acetilcolina cerebral observada en la enfermedad de Alzheimer quizá constituya la clave para comprender su patogenia: los mecanismos por los cuales algún agente causal produce las alteraciones de la conducta y del tejido cerebral. En concreto, ¿qué clase de proceso hace especialmente vulnerables a las neuronas colinérgicas de axones largos que se proyectan desde la base del cerebro hacia el hipocampo y el córtex cerebral?

Un mecanismo verosímil es una especie de autocanibalismo de las membranas neuronales. Como ya se ha mencionado, las neuronas colinérgicas son las únicas células que necesitan colina para dos usos: como precursora de un neurotransmisor y de un constituyente (fosfatidilcolina) de su membrana celular. Resultarían, por tanto, particularmente vulnerables a la carencia de colina. (El nivel de colina no es bajo en la sangre o líquido cefalorraquídeo de los afectos de la enfermedad de Alzheimer, pero incluso así podría ser inferior a lo normal en algunas terminales colinérgicas si se ha reducido su capacidad para captar colina o para sintetizar lecitina, o si consumen cantidades excesivas de colina para producir acetilcolina.) Enfrentadas a la falta de colina libre, las terminales de estas neuronas podrían degradar la fosfatilcolina de sus propias membranas para obtener la colina necesaria para producir acetilcolina. Ello alteraría la función de la membrana y, en última instancia, destruiría las terminales.

También explicaría la vulnerabilidad selectiva de las neuronas colinérgicas su carencia de un factor trófico o estimulante; varios laboratorios están buscando tal factor. Finalmente, si el proceso morboso está desencadenado por un agente infeccioso, la razón de esa vulnerabilidad selectiva quizá deba buscarse en una simple predilección del agente por las neuronas colinérgicas de axón largo.

Centrarse en la acetilcolina tiene un inconveniente: oscurece el hecho de que en la enfermedad de Alzheimer el cerebro muestra a menudo déficit importantes en otros neurotransmisores (especialmente noradrenalina y serotonina). Estos transmisores, como la acetilcolina, se encuentran ampliamente en el hipocampo y el córtex cerebral en las terminales de las neuronas cuyos cuerpos celulares se localizan en los centros cerebrales más primitivos. Parece extraño que, en una enfermedad notoria por deteriorar las funciones corticales, superiores, las alteraciones neuroquímicas conocidas se hayan demostrado en las neuronas subcorticales, sobre todo.

Modelo del elefante

La verdad es que en la enfermedad de Alzheimer también se pierde gran número de neuronas corticales; algunos pacientes han manifestado la reducción de un neurotransmisor cortical relativamente menos importante, la somatostatina. Un grupo de la Facultad de Medicina de la Universidad de Iowa sugiere en una comunicación reciente que también puedan ser dianas específicas de la enfermedad las neuronas del hipocampo que median en el transporte de información entre el hipocampo y otras regiones. La incapacidad de asociar el defecto de un transmisor determinado con la pérdida de tales neuronas puede significar que liberan un transmisor desconocido, o que comparten un transmisor con tantas otras neuronas sanas que su pérdida no reduce apreciablemente el nivel cerebral del transmisor.

Los investigadores tienden a ver, o al menos a interesarse, por seis conjuntos diferentes de manifestaciones de la enfermedad de Alzheimer, y recogen seis

grupos distintos de hechos; a partir de ahí suponen, cuando menos en lo que atañe al estudio, que la enfermedad de Alzheimer tiene su origen en la genética, en una acumulación de proteínas, una infección, una toxina, un trastorno neuroquímico o una insuficiencia vascular. Exactamente eso hicieron los seis hombres ciegos que concluyeron que un elefante era una pared, una lanza, una serpiente, un árbol, un abanico o una cuerda, según la parte que, por azar, hubieran palpado. El elefante era todo eso, pero no llegaron a percibir su "elefanticidad" esencial.

No hace muchos años, varios estudiosos supusieron, al menos en lo que atañía a la investigación, que el cáncer lo producían los virus, alimentos, genes defectuosos o una mala regulación de los genes, tóxicos ambientales, radiaciones o alteraciones inmunológicas. Todos ellos tenían razón; hoy todos van convergiendo hacia lo que puede ser la "elefanticidad" esencial del cáncer. Quizás ocurra así en el futuro con la enfermedad de Alzheimer.

Observaciones sobre la enfermedad de Alzheimer

La enfermedad de Alzheimer plantea ya graves problemas en las sociedades de los países occidentales. Se relaciona ese hecho con el aumento progresivo de la edad media de vida, y no porque la enfermedad se deba propiamente al envejecimiento, sino porque el tiempo expone el cerebro al agente (o los agentes) causales de la enfermedad, de la misma manera que también son más frecuentes los accidentes vasculares cerebrales y la enfermedad de Parkinson en las personas de edad avanzada. En España, esas tres graves enfermedades neurológicas se dan con la misma alta incidencia que en Estados Unidos o en Europa occidental.

El excelente artículo del profesor Wurtman revisa y pone el énfasis en las hipótesis sobre el posible origen de la enfermedad de Alzheimer. Se pregunta por qué razón la frecuencia y la importancia de la enfermedad no se han apreciado hasta recientemente. Cabe achacarlo a varias causas, en gran parte relacionadas con el desgraciado uso de los términos senil y presenil con que se pretendía clasificar a las demencias. Alois Alzheimer describió la degeneración neurofibrilar de las neuronas en una enferma joven, pero no prejuzgó que este hecho fuera esencial. Más tarde, otros autores establecieron categóricamente que la enfermedad era presenil, marcando un límite de edad arbitrario en los 65 años. Las demencias por encima de esa edad las provocarían el envejecimiento y la aterosclerosis (lo que también se ha probado erróneo en la mayoría de los casos). Creció la confusión al darle otros autores al término "presenil" un contenido patogénico, no cronológico, es decir, al sostener que la enfermedad de Alzheimer respondería a un envejecimiento prematuro. Poner el apellido de senil o presenil a una demencia carece de sentido, no aumenta la precisión del diagnóstico e induce a error, porque las mismas causas, aunque con distinta frecuencia, pueden actuar a cualquier edad. Los textos clásicos de neuropatología demostraron ya hace casi 40 años, aunque su enseñanza no se asimilara, la gran concordancia, con diferencias sólo cuantitativas o de matiz, entre el cuadro clínico y las lesiones propias de la enfermedad de Alzheimer a cualquier edad, desde la juvenil hasta pasados los 90 años.

Tal concepto unicista, clínico-patológico, de la enfermedad de Alzheimer no prejuzga que ésta sea una única enfermedad, esto es, que tenga una sola causa. De hecho, y como señala el profesor Wurtman, se aprecian suficientes diferencias epidemiológicas, de herencia, evolución y anomalías bioquímicas entre un grupo de pacientes y otro para sospechar la intervención de varios factores etiológicos, de predisposición genética, individuales o ambientales.

Aún así, considerar de momento la enfermedad de Alzheimer como un proceso único, a la espera de conocer su causa o sus causas, ofrece varias ventajas, como son: reconocer que se trata de una verdadera enfermedad y no una consecuencia fatal del envejecimiento, lo que llevaría a una actitud nihilista en el campo terapéutico; apreciar en su verdadera dimensión el problema socioeconómico que plantea esta enfermedad específicamente humana (no se conoce nada similar en ningún otro ser) y sensibilizar a los médicos, al público y a las autoridades sobre la necesidad de adjudicar importantes recursos a su investigación y al cuidado de los enfermos que alcanzan la penosa situación de la incapacidad y dependencia absolutas.

Un aspecto muy importante es la dificultad que entraña establecer el diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer en vida de los pacientes, sin recurrir a una biopsia del cerebro que, obviamente, sólo puede practicarse en ciertos casos. No disponemos de ningún marcador biológico de la enfermedad, ni en sangre ni en líquido cefalorraquídeo, para sentar el diagnóstico. Ni siquiera en los inicios de la enfermedad, con los primeros síntomas de fallos de memoria, concentración y humor, se sabe si no se trata de un trastorno psicológico de carácter depresivo, pues en esa fase los exámenes complementarios (electroencefalograma, tomografía axial computarizada cerebral) suelen ser normales. Conforme el cuadro clínico avanza, el electroencefalograna se altera y en la tomografía aparecen signos de atrofia cortical; sin embargo, esos datos no son en absoluto específicos, por lo que se requiere la experiencia de un equipo neurológico para el manejo de estos enfermos y, sobre todo, para excluir mediante un protocolo de estudio cualquier otra causa de demencia curable.

Es evidente que si en un futuro disponemos de alguna medida terapéutica eficaz habremos de disponer también de un medio de diagnóstico precoz, en la fase inicial a que antes me refería, antes de que aparezcan los trastornos intelectuales más graves (del lenguaje, cálculo, orientación y actividades práxicas). También en este aspecto del diagnóstico precoz se están llevando a cabo numerosas investigaciones. (J. J. Zarranz, catedrático de neurología de la Universidad del País Vasco y jefe del servicio de neurología del Hospital bilbaíno de Cruces.)

Materia nuclear caliente

El núcleo de un átomo es semejante a una gota de líquido. Las colisiones a alta velocidad entre los núcleos los calientan y comprimen, pudiendo originar nuevas fases de materia nuclear: vapor y, tal vez, sólido y plasma

Walter Greiner y Horst Stöcker

El núcleo de un átomo es una porción mínima de materia, sin parangón con cualquier otra cosa que encontremos en la vida de cada día. De extraordinaria densidad: un dedal lleno de materia nuclear pesaría un millón de toneladas. Lo que no obsta para que la sustancia del núcleo se describa a través de las mismas propiedades físicas que caracterizan cualquier otro tipo de materia. Es de interés especial la respuesta que da la materia nuclear a los cambios de temperatura, densidad y presión. El agua sufre cambios espectaculares cuando se eleva su temperatura de cero a 100 grados Celsius. La materia nuclear podría sufrir también transformaciones semejantes, pero hasta la fecha no ha habido métodos experimentales para producirlos. Por recurrir a una comparación, viene a ser como si el agua sólo pudiese estudiarse a la presión y temperatura ambientales y no se conociera nada sobre el hielo y el vapor.

Lo que ha modificado esta relación es el desarrollo de los aceleradores de iones pesados relativistas que producen colisiones de alta energía entre núcleos de masa elevada. De las colisiones se dice que son relativistas porque los núcleos corren a velocidades próximas a la de la luz y se presentan, pues, de una manera destacada los efectos de la teoría especial de la relatividad. Este tipo de colisiones nos proporciona una oportunidad única de comprimir la materia nuclear hasta varias veces su densidad normal, y de calentarla hasta temperaturas que excedan los 10^{12} grados. Estas condiciones recuerdan las que rigen en las estrellas de neutrones. En abierto contraste, el interior solar está a una temperatura de 10^6 grados sólo. Aceleradores aún más potentes podrían ser capaces de crear, a escala nuclear, el tipo de materia que existía tras el nacimiento del universo en la gran explosión.

Los aceleradores que se utilizan en la experimentación con iones pesados en condiciones relativistas son los sincrotrones, análogos a los que se emplean en física de partículas elementales. Con una diferencia: en vez de acelerarse partículas individuales (verbigracia, protones o electrones) se crean haces de iones, átomos que han perdido la mayor parte de sus electrones. Porque el núcleo contiene la mayor parte de la masa del ion, cabe hablar, simplificadoramente, de núcleos acelerados.

Las virtualidades de un acelerador de iones pesados tienen mucho que ver con la energía que puede impartir a un núcleo y de la aceleración que logre imprimirle. La energía se mide en millones o miles de millones de electronvolt (MeV o GeV) por nucleón; el tamaño del núcleo es su número total de nucleones, número másico (o número atómico de masa). El sincrofasotrón (o sincrotrón de fases) del Instituto de Investigación Nuclear de Dubna, en la Unión Soviética, acelera iones de neón (de número de masa atómico 20) hasta una energía de 4 GeV por nucleón; a esta energía, los iones viajan al 98 por ciento de la velocidad de la luz. El Bevalac del laboratorio Lawrence Berkeley de la Universidad de California alcanza 2 GeV por nucleón con iones tan pesados como el uranio (con un número atómico de masa de 238).

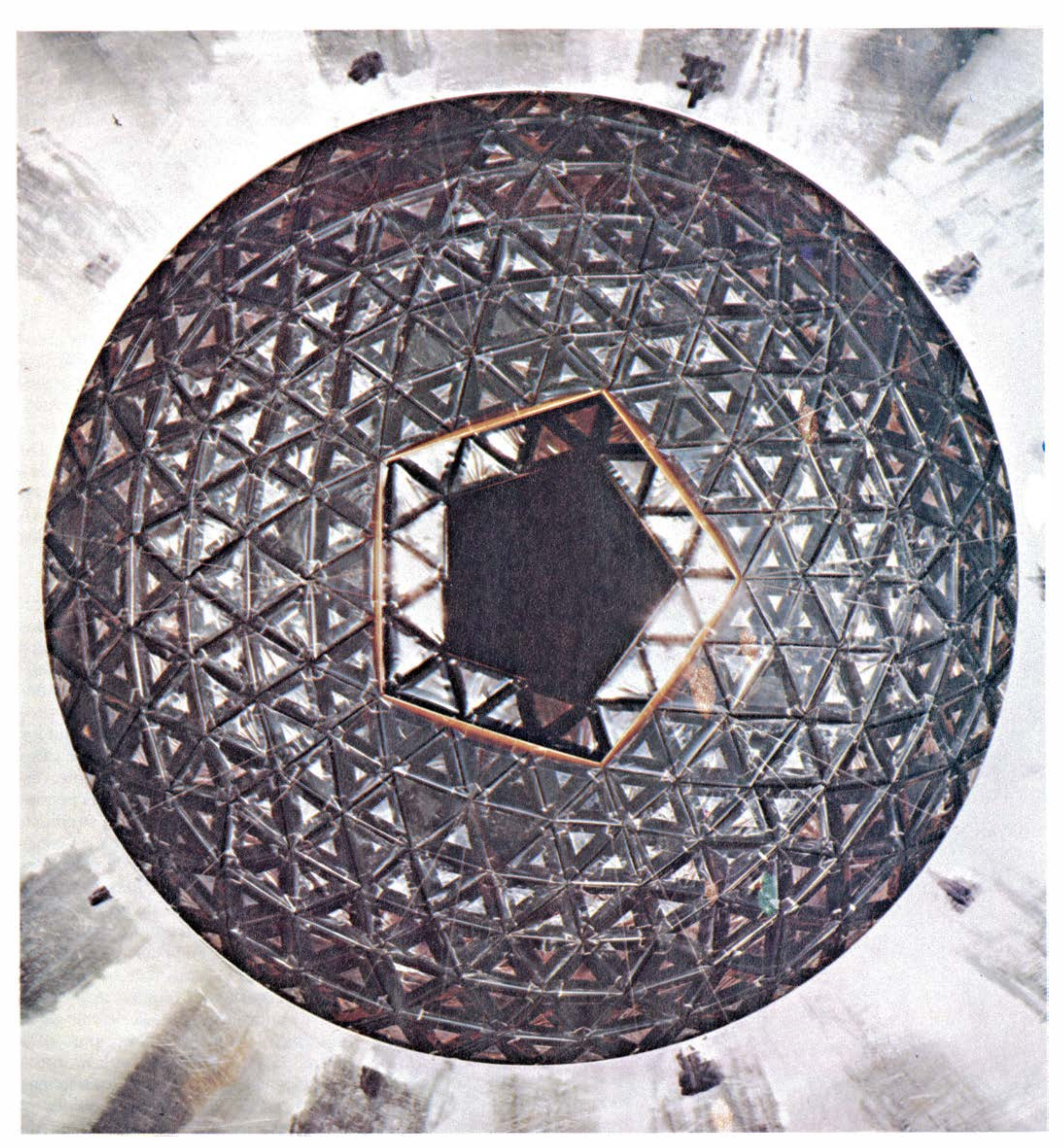
Los núcleos acelerados colisionan con otros núcleos de un blanco estacionario. Qué productos se deriven de la colisión dependerá de varios factores: energía de los iones acelerados, masa de proyectiles y blancos y, por último, "parámetro de impacto", que indica si se ha atacado el núcleo de frente o tangencialmente. Como cabría esperar, las colisiones más violentas se producen frontalmente y a alta energía entre núcleos muy pesados.

Con el estudio de estos sucesos se pretende, sobre todo, determinar la ecuación de estado de la materia nuclear, es decir, la ecuación que describe la respuesta del núcleo a los cambios de temperatura, presión y densidad. Para una sustancia normal, piénsese en el agua, la ecuación de estado se resuelve en un experimento directo. El agua sometida a presión atmosférica atraviesa una secuencia familiar de fases: es sólida por debajo de cero grados, líquida hasta los 100 grados y, por encima, vapor. A temperaturas mucho más altas, de 1000 grados aproximadamente, las moléculas de agua se destruyen en violentas colisiones y el agua se convierte en un plasma formado por iones cargados eléctricamente y electrones.

Se cree que existen fases análogas en la materia nuclear densa y caliente. En el estado fundamental o normal, el núcleo se parece a una gota de un líquido: los protones y neutrones individuales (denominados conjuntamente nucleones) se mueven con bastante libertad en el interior de la gota, pero muy raramente traspasan su superficie. En el estado fundamental donde la temperatura es cero, la densidad se cifra en $2{,}8 \times 10^{14}$ gramos por centímetro cúbico y la presión es cero. (La presión debe ser nula por la sencilla razón de que el núcleo no está confinado; si hubiera presión positiva, el núcleo se expandiría y si la presión fuera negativa se contraería.)

El estudio de las colisiones de iones pesados ha sacado a luz una transición a alta temperatura en una fase semejante al vapor, en la que los nucleones se mueven con rapidez suficiente para superar las fuerzas de cohesión. En esencia, la materia nuclear parece hervir. A temperaturas todavía más altas, los propios nucleones se transforman en partículas de masa mayor. Se sospecha que, a alta densidad y temperatura baja, habría una fase de materia nuclear ordenada, cual sólido cristalino. Si puede alcanzarse una compresión o un calentamiento mayor, los nucleones se destruirían y aparecería el equivalente nuclear de un plasma: consistiría éste en quarks y gluones, las partículas integrantes de los nucleones.

No es posible estudiar el diagrama de fases de la materia nuclear, ni siquiera usando haces de iones pesados relativistas, mediante los experimentos diseñados y cuidadosamente controlados que se emplean con las otras formas de la materia. Una colisión de alta energía entre dos núcleos puede ser cualquier cosa menos controlable. Los núcleos chocan uno contra otro e interaccionan vigorosamente, elevando la densidad y la temperatura y, en consecuencia, la presión. No hay ningún instrumento que mida directamente estas cantidades. Además, el estado de alta densidad es de vida muy corta; en unos 10^{-22} segundos, el núcleo formado estalla, dispersando fragmentos de materia nuclear por todas las direcciones. Estos fragmentos pueden detectarse mediante los instrumentos apropiados que ro-

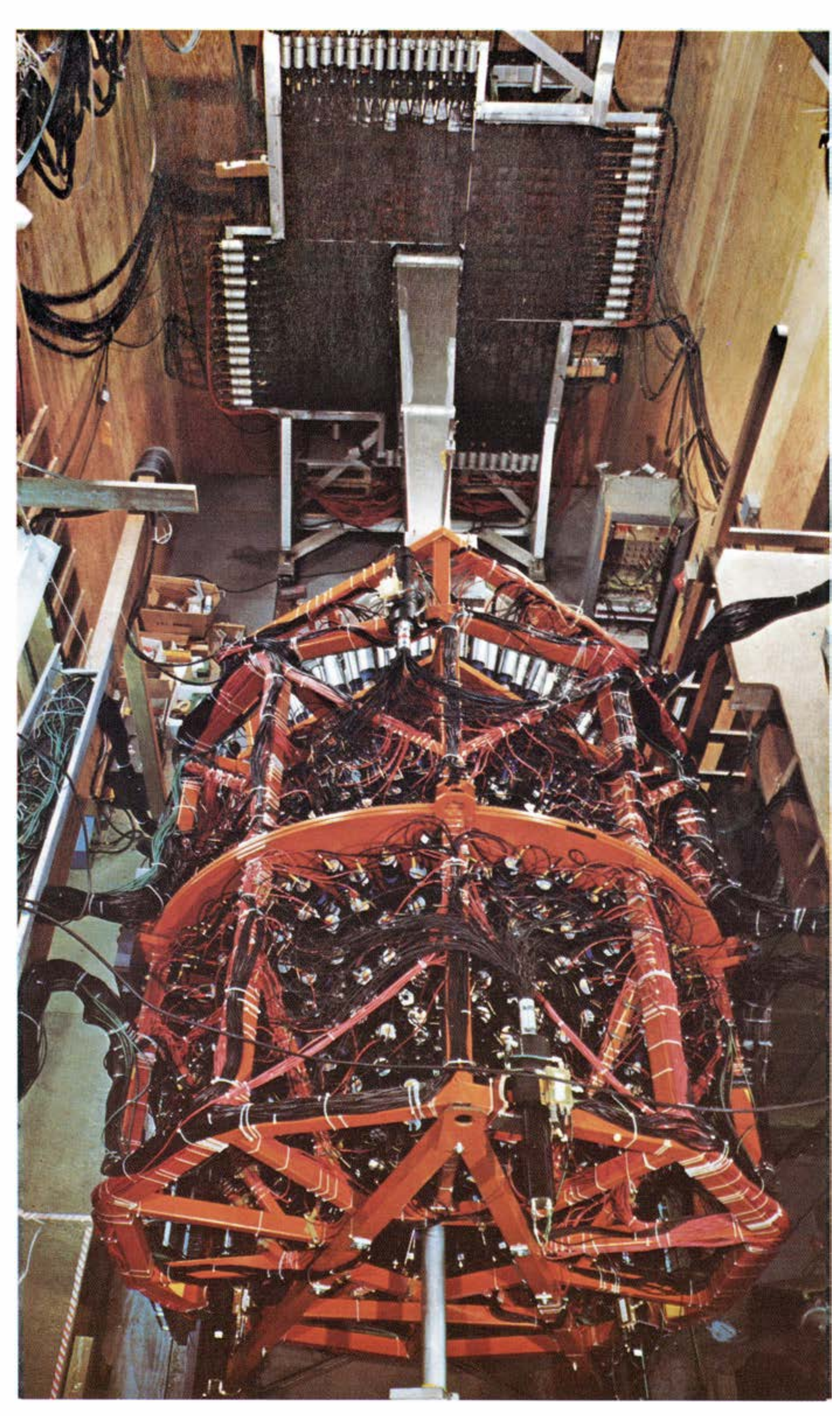


1. ESTE HEMISFERIO DE MOSAICO forma parte de un instrumento llamado balón de plástico GSI-LBL, que detecta los residuos emitidos cuando colisionan dos núcleos atómicos a altas energías. La fotografía es del lado interior cóncavo del hemisferio, mirando a lo largo del camino seguido por un haz de iones (átomos desprovistos de todos o de la mayoría de sus electrones), pesados y acelerados. Cuando se monta el detector, otro hemisferio semejante se une a éste; en el centro, en el camino del haz, se coloca un blanco. La esfera entera tiene 815 facetas; cada una de las cuales es un detector. Cada uno de éstos consiste en un cristal delgado de fluoruro de calcio colocado en el extremo de una varilla de plástico transparente. Cuando un fragmento de una colisión nuclear, cargado eléctricamente, llega a una de las caras, atraviesa el fluoruro de calcio para detenerse en el plástico, produciéndose un centelleo en ambos materiales, es decir, la emisión de un destello de luz. La posición de la faceta nos permite conocer la dirección del resto desprendido; los dos centelleos nos ayudan a determinar su energía y masa. Sistemas de detección de esta complejidad son corrientes en la física de partículas elementales, pero, hasta hace muy poco, apenas si se empleaban en física nuclear. Dado que este tipo de detector permite reconstruir una colisión aun cuando se emitan centenares de fragmentos, proporciona una visión, de excepcional nitidez, de la naturaleza de la materia nuclear expuesta a altas presiones y densidades.

dean la región de interacción. Cuanto podamos conocer de la colisión se deducirá de la distribución de estos restos.

En cierto experimento, se aceleró un núcleo de carbono (de masa atómica igual a 12) hasta una energía moderada, de 70 MeV por nucleón; se le obligó a chocar casi de frente contra un núcleo de plata (de masa atómica 108). El núcleo de plata estaba en una emulsión fotográfica que servía, simultáneamente, de blanco y detector. En la desintegración subsiguiente de ambos núcleos, se emitieron 16 fragmentos nucleares eléctricamente cargados: eran núcleos de elementos ligeros, deuterio, helio, litio y berilio, que tienen de 2 a 9 nucleones. Pueden interpretarse como las partículas evaporadas en la ebullición del líquido nuclear [*véase la figura 4*].

En otro experimento, las colisiones se realizaron en una cámara de trazas, en las que el paso de una partícula cargada deja un sendero brillante de descargas eléctricas. Un núcleo de argón acelerado a una energía de 1,8 GeV por nucleón golpeaba, también de forma frontal, un núcleo de plomo de un blanco fijo. A tan elevada energía, los dos núcleos, que tienen más de 250 nucleones entre ambos, se destruían completamente. Entre los fragmentos emitidos en la colisión predominaban los nucleones individuales y conjuntos de dos o tres nucleones. Sin ninguna clase de dudas, los restos que emergían de la colisión contenían más de 130 partículas elementales cargadas, cantidad considerablemente superior a los cien protones dotados de carga eléctrica que existían en los núcleos originales. ¿De dónde procedían las cargas suplementarias? La violencia de la colisión creó más de 30 partículas nuevas, principalmente piones positivos y negativos [*véase la figura 5*].

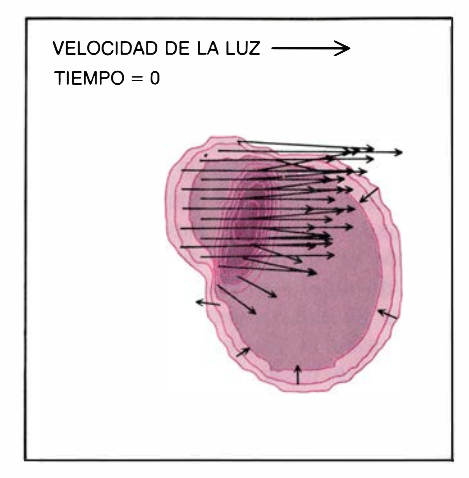


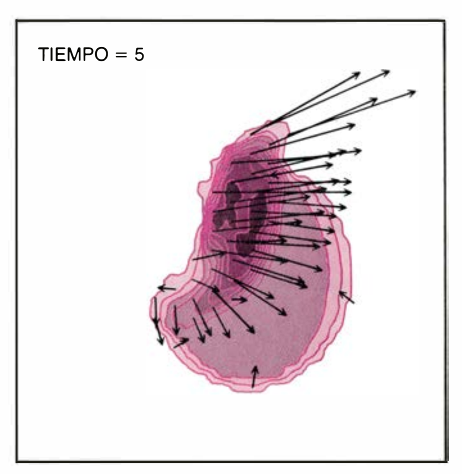
2. BALON DE PLASTICO instalado en el Bevalac, acelerador de iones pesados que se encuentra en el laboratorio Lawrence Berkeley de la Universidad de California. La esfera de elementos detectores está tapada por los tubos fotomultiplicadores que registran los centelleos y por los cables que suministran electricidad y reciben los datos de los fotomultiplicadores. El haz de iones pesados viaja en la línea de vacío de aluminio que entra en el detector en la parte inferior de la fotografía. En el fondo de la sala, puede apreciarse un sistema detector adicional, llamado "pared de plástico", que proporciona información sobre los fragmentos de alta energía emitidos con un ángulo pequeño respecto al eje del haz.

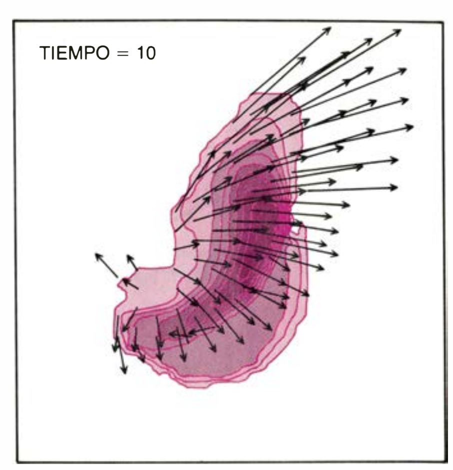
¿Cómo se interpretan tales sucesos? ¿Cuáles son los procesos físicos que ocurren cuando dos núcleos pesados colisionan a velocidades relativistas? El método más riguroso de análisis debería ser el cálculo de los productos de la colisión de acuerdo con los principios de la teoría cuántica de campos. Pero esto es de todo punto inviable. Incluso para el núcleo más pequeño, este tipo de cálculos es un auténtico reto matemático; y una tarea sin esperanzas de éxito en el caso de colisiones entre núcleos con un número mayor de nucleones (en el caso de un núcleo de uranio que choque contra un blanco de uranio, hay casi 500 nucleones).

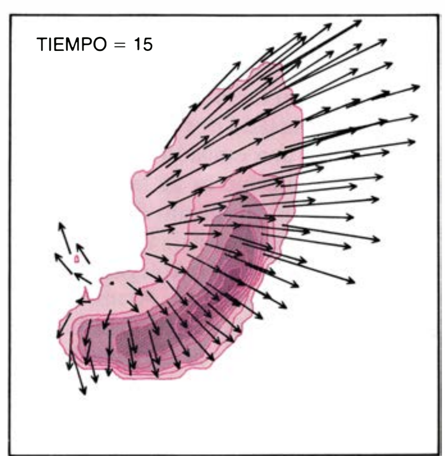
Aunque la existencia de un gran número de partículas elimina la posibilidad de aplicar modelos de cálculo de la mecánica cuántica, abre, por otra parte, la posibilidad de aplicar otros modelos. Después de todo, los sistemas físicos como los sólidos, líquidos y gases macroscópicos se componen de un número enorme de partículas y admiten un tratamiento teórico muy preciso. Indudablemente, la existencia de un gran número de partículas puede ser una ayuda para el análisis de los mismos mediante el uso de modelos basados en estimaciones estadísticas.

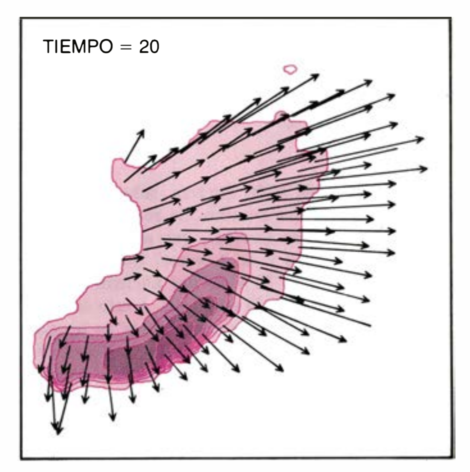
En el estudio de las colisiones de

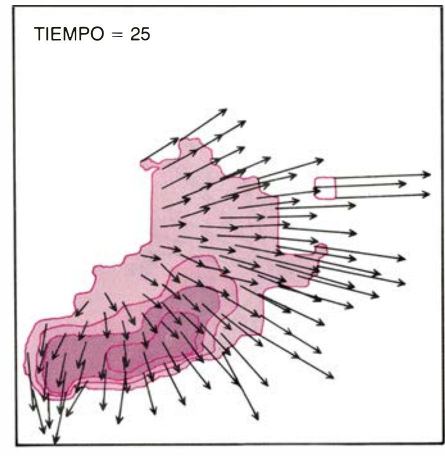












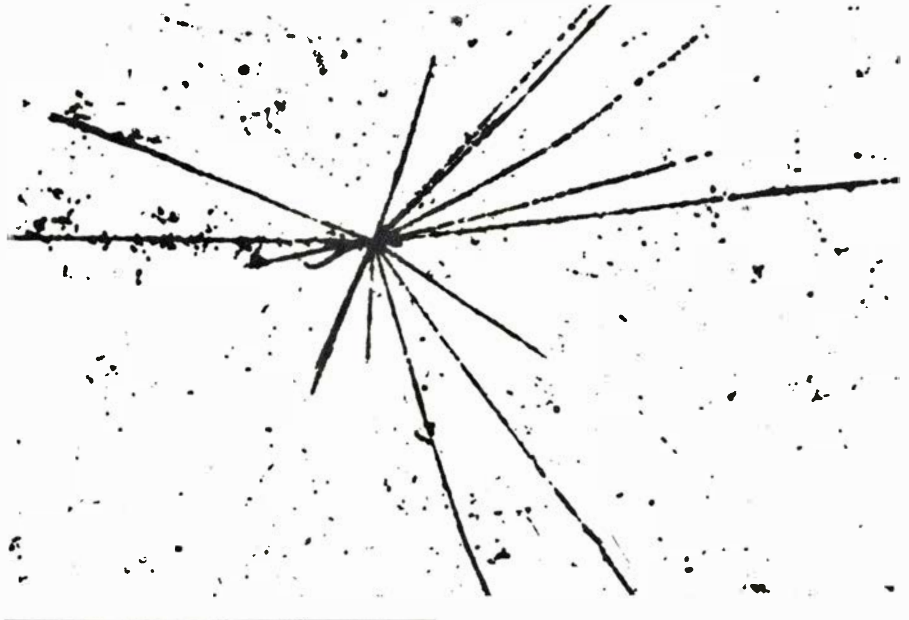
3. ONDA DE CHOQUE SUPERSONICA, que se propaga, según muestra el esquema, a través de la materia nuclear en la colisión de dos núcleos atómicos. El proyectil, un núcleo de argón formado por 40 nucleones, se aproxima desde la izquierda con una energía de 800 millones de electronvolt (MeV) por nucleón. Avanzando al ochenta por ciento de la velocidad de la luz el proyectil golpea un blanco constituido por un núcleo de plomo, mucho mayor (208 nucleones). En el esquema, los núcleos se representan como gotas de un fluido y su comportamiento se determina por métodos hidrodinámicos. Las flechas muestran la velocidad de volúmenes pequeños del fluido y las líneas de contorno indican la densidad. En los estados primitivos de la colisión el fluido nuclear se calienta y se comprime solamente en la región de interpenetración. La onda de choque se desarrolla moviéndose primero hacia delante y luego lateralmente. Por último, cuando el núcleo fundido se desintegra, se emiten multitud de fragmentos hacia los lados. El tiempo está indicado en las unidades de tiempo que la luz necesita para recorrer un fermi de distancia, esto es, 10^{-13} centímetros. Los cálculos del modelo fueron realizados por G. Graebner.

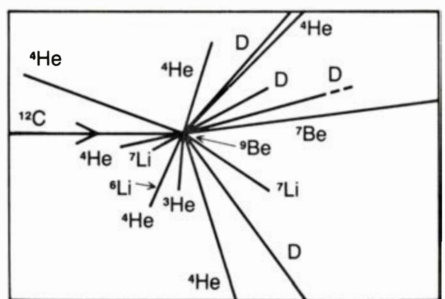
iones pesados, dos modelos diferentes han llegado a tener importancia real. En el primero, el núcleo se considera como una gota de líquido y se emplean las ecuaciones de la hidrodinámica para describir la colisión de dos gotas de este tipo. Las partículas que forman los núcleos no se consideran en absoluto en el modelo; tampoco las moléculas de agua se consideran en la descripción hidrodinámica de una gota de agua de lluvia. De esta forma, la materia nuclear se trata como un fluido ideal continuo. El modelo hidrodinámico se aplicó, por primera vez, a las colisiones nucleares relativistas hace diez años, gracias a Werner Scheid, Hans J. Müller, Jürgen Hofmann y uno de los autores (Greiner), de la Universidad de Frankfurt, y a George F. Chapline, Michael H. Johnson, Edward Teller y Morton S. Weiss, del laboratorio Lawrence Livermore.

En el segundo modelo, llamado modelo en cascada, los nucleones aparecen explícitamente; de hecho, el núcleo no consta de nada más. Podemos abordar el cálculo directo de sus trayectorias partiendo de la hipótesis simplificadora de que cada nucleón se mueva con libertad y avance en línea recta, excepto cuando choca contra otro nucleón. El modelo ignora totalmente las complejas fuerzas que mantienen agrupados los nucleones. Los núcleos colisionantes son semejantes a bolsas de canicas. En el modelo en cascada, los productos de una colisión se determinan simulando los recorridos de los nucleones en un ordenador: la simulación debe repetirse miles de veces con configuraciones iniciales diferentes de los nucleones. El modelo en cascada fue desarrollado por Zeev Frakel, del Instituto Politécnico Weizmann de Israel, Vladislav D. Toneev, del Instituto Politécnico de Investigación Nuclear de Dubna, y Joseph Cugnon y sus colegas, de la Universidad estatal de Liège, en Bélgica.

Las predicciones de los dos modelos son susceptibles de comparación estudiando su descripción de una colisión niobio-niobio [*véanse las figuras 7 y 8*]. En ambos casos, la primera etapa es una interpenetración parcial de ambos núcleos entre sí, formando una región elipsoidal de densidad muy alta. Cuando la colisión prosigue entra más materia en la región de compresión, hasta que todos los nucleones están dentro de un volumen no mayor que uno de los núcleos originales. El núcleo fundido y comprimido empieza, entonces, a expandirse de nuevo y muy pronto supera ampliamente los volúmenes originales. E inmediatamente se produce una desintegración explosiva.

Las diferencias principales entre los dos modelos se encuentran en las etapas finales de la reacción. En el modelo en cascada, la mayoría de los nucleones se emiten de forma aproximadamente paralela al eje del haz, en dirección "frontal" según el marco de referencia del laboratorio. A pesar de la alta compresión alcanzada y de los mi-





4. FRAGMENTACION nuclear subsiguiente a una colisión de iones pesados. Se registra en una emulsión fotográfica (*arriba*), que actúa simultáneamente de blanco y de detector. Un núcleo de carbono acelerado a 70 MeV por nucleón ha golpeado otro de plata de la emulsión. A esta energía tan moderada, se emiten desde el lugar de la colisión 16 fragmentos de materia nuclear (*etiquetados en el diagrama de la izquierda*). Son núcleos de deuterio, helio, litio y berilio, que tienen de dos a nueve nucleones. El suceso fue registrado por Bo Jakobsson y otros, de la Universidad de Lund.

llares de choques individuales nucleón-nucleón, los núcleos son bastante transparentes; muchos nucleones atraviesan, pues, el blanco. En cambio, en el modelo hidrodinámico, los núcleos se paran mutuamente. En virtud de la alta presión desarrollada, se produce un fuerte máximo lateral en la emisión de nucleones, perpendicular al eje del haz.

La naturaleza y el origen de la emisión lateral en el modelo hidrodinámico puede comprenderse más claramente observando lo que sucede cuando un proyectil de argón alcanza un núcleo de plomo del blanco [*véase la figura 3*]. El proyectil, con una energía de 800 MeV por nucleón, se mueve, aproximadamente, al 80 por ciento de la velocidad de la luz, que es alrededor de cuatro veces mayor que la velocidad del sonido en la materia nuclear a la densidad del estado fundamental. Cuando el proyectil penetra en el blanco, se forma una onda de choque supersónica por delante de la región de colisión. La onda de choque es análoga a la formada por un avión supersónico en la atmósfera de la Tierra. Al principio, la onda tiende hacia adelante; pero en las últimas etapas de la colisión, cuando empuja la materia que se encuentra en su camino, empieza a propagarse también hacia atrás. En las últimas etapas de la colisión, cuando el sistema ha alcanzado una densidad baja y ha empezado a fragmentarse, el flujo colectivo de materia causado por la onda de choque produce una emisión lateral preferente de los productos de la reacción.

Los modelos de cálculo del tipo aquí presentado se deben a J. Rayford Nix, Daniel Strottman y sus colegas, del Laboratorio Nacional Los Alamos, y a Gerd Buchwald, Gerhard Graebner y Joachim Maruhn, de la Universidad de Frankfurt, trabajando en equipo con los autores.

¿Qué es lo que la naturaleza responde acerca de las diferentes predicciones de los dos modelos? ¿Se detienen mutuamente los nucleones o son transparentes? Lo primero que debe señalarse es que la interpretación de los resultados experimentales está condicionada por las limitaciones técnicas. Hasta hace poco, la mayoría de los experimentos en física nuclear se realizaban con instrumentación bastante simple y barata. Cuando el foco del interés se desplaza hacia las altas energías, se necesitan detectores más refinados para suministrar nueva información sobre los productos de la reacción. En tal caso, es vital distinguir entre colisiones de frente, o centrales, que producen una fuerte onda de choque, y colisiones periféricas, que no la producen. Un buen criterio para establecer esta distinción se basa en el número de fragmentos emitidos; ahora bien, con detectores poco avanzados la selección de estos sucesos múltiples se lleva a cabo sólo mediante aproximaciones.

Los primeros experimentos realizados por Hans-Georg Baumgardt y Erwin Schopper, de la Universidad de Frankfurt, parecían confirmar las predicciones del modelo hidrodinámico de emisión lateral. Baumgardt y Schopper expusieron detectores de estado sólido a los haces generados por el Bevalac y

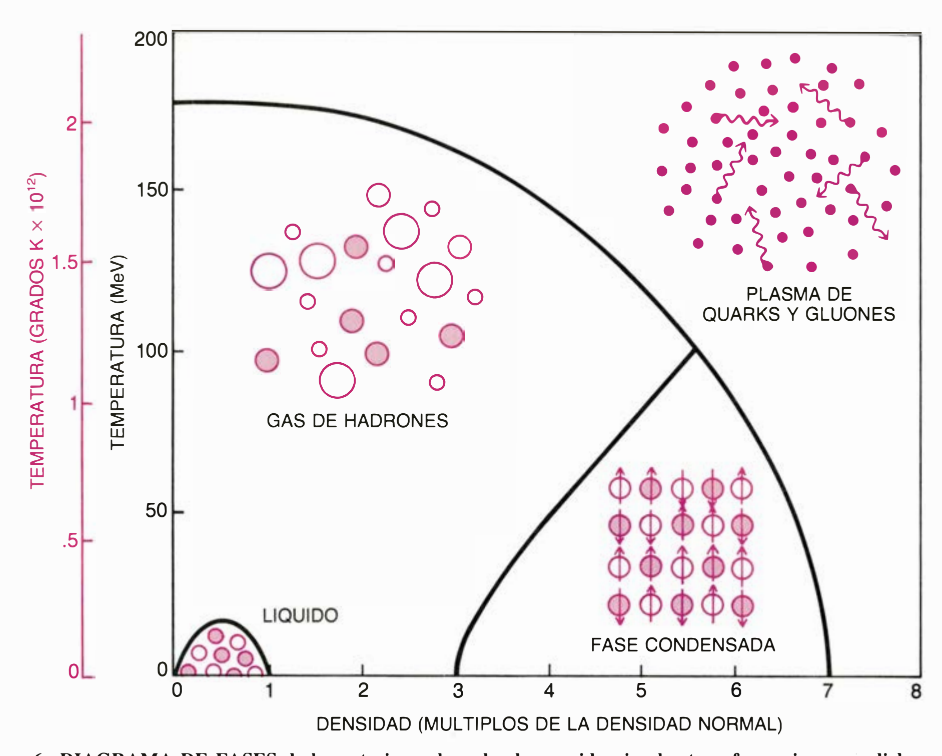


5. OTRO IMPACTO, MAS VIOLENTO, DE NUCLEOS MAYORES a energías más altas. De éste resulta una desintegración completa de la materia nuclear. Un proyectil de argón a una energía de 1800 millones de electronvolt (GeV) por nucleón y un blanco de plomo estallan en nucleones individuales y racimos que engarzan dos o tres nucleones. Más de 130 fragmentos salen despedidos. En la fotografía, obtenida por Robert T. Poe y sus colegas de la Universidad de California en Riverside, los recorridos de las partículas cargadas están marcados por las estelas de las descargas eléctricas en una cámara de trazas.

por el acelerador sincofasotrón de Dubna. Seleccionaron, entonces, para el análisis únicamente sucesos de alta multiplicidad; midieron la distribución angular de los fragmentos de helio emitidos. Encontraron un pico lateral sobre la emisión de fondo isótropa, carente de dirección preferencial.

Para obtener datos de mayor fiabilidad estadística, se construyó un detector basado en contadores electrónicos de partículas en un trabajo conjunto emprendido por un grupo del Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), de Darmstadt, en Alemania Occidental, bajo la dirección de Hans H. Gutbrod y Reinhard Stock, y por otro grupo del laboratorio Lawrence Berkeley (LBL), dirigido por Arthur M. Poskanzer. En los sucesos de alta multiplicidad (correspondientes a colisiones centrales), las partículas de baja energía cinética mostraron un pico lateral. Los resultados corroboraban los cálculos del modelo hidrodinámico debidos a Maruhn y los autores.

El flujo colectivo lateral, predicho por los cálculos del modelo hidrodinámico, quedó establecido sin la menor ambigüedad en los recientes experimentos llevados a cabo por Hans-Georg Ritter, Gutbrod, Poskanzer y sus colegas del grupo GSI-LBL. Los experimentos se realizaron con un nuevo sistema de detectores llamado balón de plástico. En una capa esférica que rodea al blanco se acomodan más de 800 elementos detectores de plástico; registran, además del número de fragmentos emitidos, sus masas, cargas y energías. El balón de plástico se empleó por primera vez para estudiar colisiones centrales entre núcleos de igual masa, en las que el modelo hidrodinámico predice las emisiones laterales más intensas. En las colisiones calcio-calcio (número de masa atómico igual a 40), no se detectó ningún pico lateral. Sin embargo, en la colisión niobio-niobio (masa atómica 93), se encontró un pico de emisión lateral bien definido, de acuerdo con los cálculos del modelo hidrodinámico realizados por Buchwald, Graebner, Maruhn y los autores.



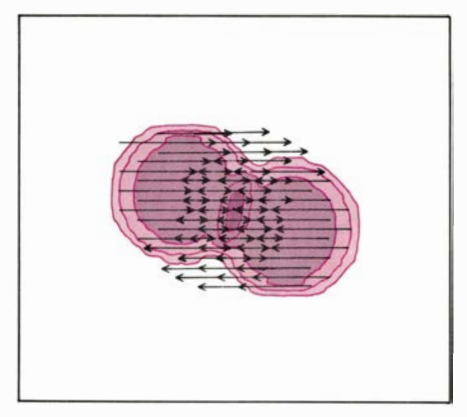
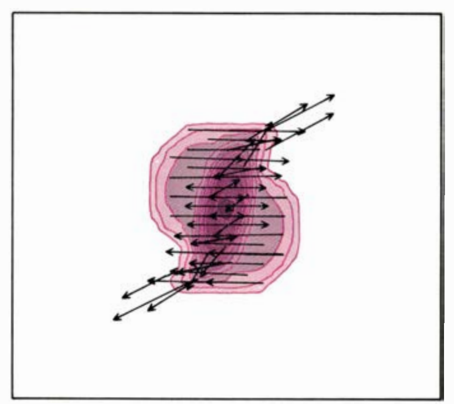
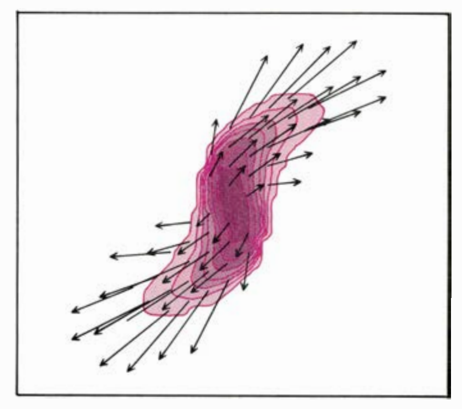
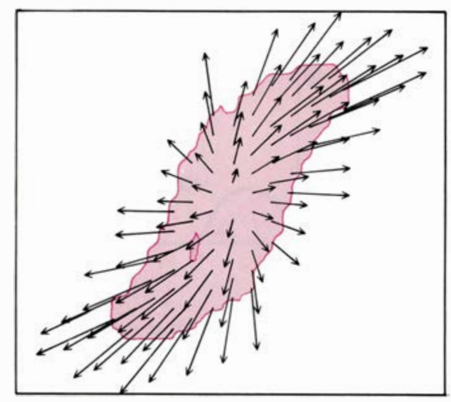
6. DIAGRAMA DE FASES de la materia nuclear donde se evidencian las transformaciones predichas por diversas teorías y conjeturas. El estado normal de la materia nuclear, semejante a un líquido, ocupa la esquina inferior izquierda del diagrama. A temperatura y densidad elevadas, el líquido se evapora formando un gas constituido no sólo por nucleones, sino también por piones y partículas más pesadas, conocidas genéricamente como hadrones. Con más calentamiento y presión, los propios hadrones se rompen en sus partículas integrantes, los quarks y gluones, creando una mezcla semejante a un plasma, llamada quagma. A densidad alta y temperatura relativamente baja, la materia nuclear podría congelarse en una estructura reticular análoga a la de un sólido cristalino. Protones y neutrones, con espines orientados en direcciones opuestas, se alternarían en la red. La densidad se toma aquí con cierta libertad.

¿En qué situación nos hallamos? Las versiones más simples del modelo en cascada parecen limitarse a describir las interacciones de los núcleos más ligeros. El modelo hidrodinámico goza de un apoyo mucho más amplio para la descripción de las colisiones centrales entre los núcleos de mayor masa. Su éxito establece el mecanismo clave para crear en el laboratorio materia nuclear comprimida y caliente: la propagación de la onda de choque nuclear. El tener a mano tal mecanismo significa un estímulo importante en la búsqueda experimental de estados de la materia nuclear nuevos y "anormales".

Un indicador de la transición de fase líquida a fase de vapor en materia nuclear es el incremento de la entropía, la medida del desorden de un sistema. Cuando se comprimen los núcleos colisionantes, la temperatura aumenta; los nucleones se agitan más violentamente en sus movimientos al azar. De ello se deduce que los nucleones aumentan su desorden y la entropía se incrementa. Cuando la materia comprimida se expande de nuevo, la temperatura baja, pero la entropía generada en la colisión no puede disiparse (de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica). En otras palabras, una vez que el movimiento de los nucleones ha llegado a ser más caótico, no puede restaurarse el orden primitivo.

La producción de entropía en una colisión tiene efectos bien definidos en los restos que aparecen finalmente en el detector. En general, cuando la entropía aumenta, la materia nuclear se rompe en un número mayor de fragmentos menores. Este efecto se ha visto claramente en las dos colisiones examinadas antes. Barbara V. Jacak, Gary D. Westfall, Konrad Gelbke, David Scotty sus colegas, de la Universidad estatal de Michigan, han utilizado el efecto de la entropía en el espectro de masas para medir la entropía producida en las colisiones. Encontraron que, a impactos de energías intermedias, la entropía es considerablemente más alta que la que cabría esperar de los cálculos basados en las propiedades de la materia nuclear normal.

Entre las diversas explicaciones del exceso de entropía reviste particular interés cierta posibilidad. La entropía adicional puede ser un producto de la transición de fase de líquido a vapor. Según Laszlo P. Csernai, de la Universidad de Minnesota, la secuencia de sucesos podría ser la siguiente. Al principio, en la etapa de compresión de la colisión, parte de la energía del impacto suministra el calor de vaporización necesario para inducir el cambio de fase. En la subsiguiente etapa de expansión, algunos de los nucleones se evaporan convirtiéndose en partículas de gas que se mueven libremente. Sin embargo, cuando los nucleones abandonan la región de intenso calentamiento, la materia nuclear se condensa

7. PARA EL MODELO HIDRODINAMICO, la colisión de iones pesados se asemejaría a la fusión de dos gotas de líquido. En los dibujos, con los cálculos realizados por Gerard Buchwald, colisionan dos núcleos de niobio casi frontalmente. La colisión se representa con el centro de la masa constituyendo el origen del sistema de coordenadas; los núcleos parecen moverse, pues, con igual velocidad en direcciones opuestas. El flujo de materia tiene un componente importante perpendicular al primitivo eje del movimiento.

de nuevo en forma líquida, liberando el calor latente de vaporización. La liberación de esta energía origina el exceso de entropía; indudablemente, la contribución del cambio de fase a la entropía podría ser mayor que la producida por las etapas de calentamiento y compresión originales.

Se sabe que las formas de alta densidad de la materia nuclear son inestables. Estas formas sólo pueden crearse suministrando energía suficiente para apiñar estrechamente los nucleones y, cuando las fuerzas de compresión dejan de aplicarse o se disipan, la materia nuclear se expande inmediatamente. Lo que esto implica en términos matemáticos es que la curva descrita por la ecuación de estado aumenta con la densidad. Sin embargo, no hay ninguna ley de la naturaleza que exija que la curva continúe subiendo indefinidamente. La curva podría tener un mínimo secundario, correspondiente a una configuración estable de alta densidad. Una vez establecida esta configuración se mantendría sin presión alguna. Quienes primero hablaron de la existencia de estos "isómeros de densidad" estables para la materia nuclear fueron Arnold R. Bodmer, del laboratorio nacional de Argonne, T. D. Lee y G. C. Wick, de la Universidad de Columbia, y A. B. Migdal, de la Universidad de Moscú.

Para comprender la noción de "isómeros de densidad" es útil otra vez la analogía con la materia común; en este caso, la equiparación con las fases sólidas del carbono. A la presión ambiental, la forma cristalina estable del carbono es el grafito; aunque puede comprimirse, en cuanto remite esa fuerza torna a su densidad primitiva. Pero si la presión aplicada rebasa cierto umbral, los átomos de carbono adoptan una nueva configuración geométrica más densa, la del diamante. A baja presión, el diamante es metaestable; no es la forma cristalina del carbono de energía más baja, sino que una barrera energética inhibe su transformación en grafito.

Lee y Wick sugirieron que si la materia nuclear pudiese comprimirse lo suficiente para crear un "isómero de alta densidad", podrían formar "núcleos anormales" superdensos, constituidos por 300 o 100.000 nucleones. Los nucleones mismos cederían casi toda su masa a una espesa sopa de piones (las partículas que soportan los campos de fuerza nuclear), donde estarían embebidos. Otro mecanismo que podría conducir a la formación de un isómero de densidad fue el propuesto por John Boguta, de la Universidad de California en Berkeley. En el fuerte campo nuclear generado por un conjunto muy denso de nucleones, la masa efectiva de varios estados excitados del nucleón podría reducirse a un valor no mucho mayor que el del nucleón en su estado fundamental. Podrían producirse muchos estados excitados merced a las fluctuaciones térmicas, incluso a baja temperatura.

Un tercer mecanismo, llamado condensación de piones, se basa en los cálculos de la interacción entre nucleones y piones realizados por Migdal y por Gerald E. Brown y Wolfram Weise, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Sus resultados muestran que, a dos o tres veces la densidad nuclear normal, los piones pueden ligar los nucleones dentro de una estructura reticular comparable a la de los sólidos cristalinos. Los protones y los neutrones, así como la orientación del espín intrínseco de las partículas, se irían alternando en la red.

¿Hay pruebas experimentales de estas peculiares formas de materia nuclear de alta densidad? Junto con Scheid, los autores han considerado (mediante cálculos hidrodinámicos) los sucesos que podrían señalar la formación de estados anormales, caso que existan. Descubrimos que, cuando se traspasa el umbral de la formación de núcleos superdensos, tendría que haber un incremento brusco en el número de piones emitidos. Los piones adicionales los aportaría el núcleo al superar la barrera de energía y descender al mínimo secundario de la curva de energía.

John W. Harris, Andrés Sandoval y Stock, del grupo de la cámara de trazas del GSI-LBL, han medido recientemente la multiplicidad de los piones que se originan en las colisiones de núcleos de argón y han observado que el número de piones se incrementa de forma suave y lineal con la energía de las partículas bombardeantes, sin presentar saltos bruscos. De cuyos datos obtuvieron una ecuación del estado nuclear que aumenta gradualmente con la densidad y no muestra signos de mínimos secundarios anormales.

De estos resultados podría concluirse que los estados anormales no existen en la naturaleza. Sin embargo, cabe también que los aceleradores de la generación actual no logren ensamblar una cantidad suficientemente alta de nucleones y mantener la densidad que

se requiere para cruzar la barrera energética, si es que existe.

Los éxitos cosechados por el modelo hidrodinámico para las colisiones de iones pesados nos traen algunas sorpresas. El modelo se basa en los conceptos termodinámicos de temperatura y presión, que pueden aplicarse con propiedad únicamente a sistemas próximos al equilibrio térmico. Más concretamente, la temperatura mide la fuerza de los movimientos aleatorios de las partículas de un sistema; ahora bien, para que la medida sea válida, los movimientos deben ser realmente al azar. No es nada obvio que esta condición se cumpla en la materia nuclear.

En un fluido, el movimiento se torna aleatorio y el sistema alcanza el equilibrio térmico si el recorrido libre medio –la distancia promedio que una partícula recorre entre dos colisiones– es pequeño comparado con las dimensiones totales del sistema. Los cálculos del recorrido libre medio de un nucleón demuestran que la materia nuclear normal apenas cumple estas condiciones: el recorrido libre medio es de un fermi o dos (un fermi es igual a 10^{-13} centímetros), mientras que el diámetro de un núcleo grande está entre 8 y 14 fermi. En una colisión de iones pesados, la compresión y ciertos efectos más sutiles acortan el recorrido libre medio. Por otra parte, la interacción es extraordinariamente breve. ¿Permanece compacto el sistema durante un tiempo suficiente para que la energía del impacto se distribuya al azar entre los nucleones?

La justificación para describir las colisiones de los núcleos en términos termodinámicos se basa en que las temperaturas que predice el modelo están de acuerdo con los resultados experimentales. La temperatura alcanzada en una colisión se puede estimar a partir de la distribución de energía de los fragmentos emitidos. Las temperaturas deducidas de esta forma están de acuerdo, en un rango de tres órdenes de magnitud, con las calculadas a través de los métodos hidrodinámicos. A energías de impacto más altas aparece, sin embargo, una discrepancia: la temperatura no aumenta con la rapidez que el modelo sugiere.

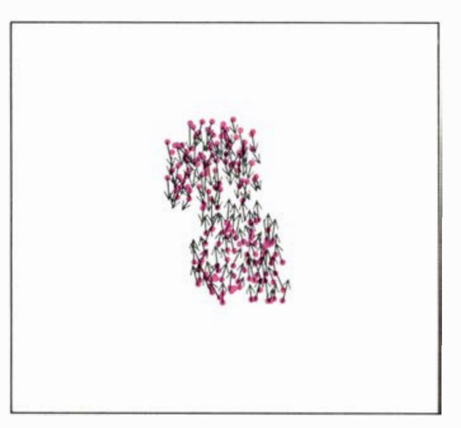
El aplanamiento de la curva de temperatura no encierra misterio alguno: ocurre porque una descripción completa del proceso de colisión debe tener en cuenta no solamente la física nuclear sino también la física de las partículas elementales. Los nucleones no son esferas inertes y duras: a energía suficientemente alta, están sometidos a transformaciones internas de forma semejante a como los átomos y las moléculas sufren cambios químicos a altas temperaturas.

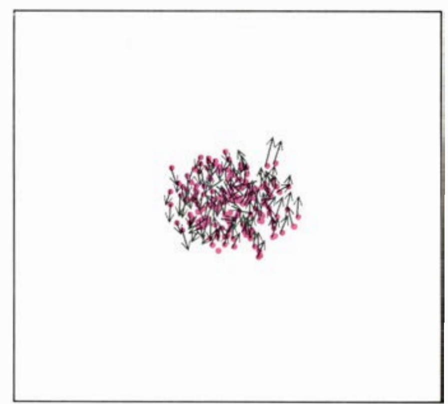
El protón y el neutrón pertenecen a la amplia clase de partículas llamadas hadrones. Se cree que estas partículas están formadas por constituyentes más elementales, llamados quarks. Hay dos grupos básicos de hadrones: los bariones, formados por tres quarks, y los mesones, que constan de un quark y un antiquark. Los nucleones son los bariones de masa más pequeña y los piones son los mesones de masa menor. La creación de hadrones de masa mayor limita la temperatura alcanzada en las colisiones nucleares violentas.

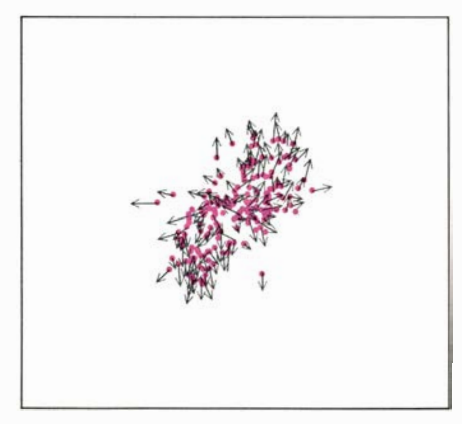
Los piones son los primeros hadrones en aparecer. La masa en reposo de un pion es de unos 140 MeV, que constituye el umbral para la producción de piones en las colisiones protón-protón. En las colisiones nucleares se ha observado la emisión de piones, incluso a energías bajísimas: 25 MeV por nucleón. Con esas condiciones, el mecanismo de producción de piones requiere, obviamente, la acción cooperativa de muchos nucleones cuya energía total sobrepase el umbral.

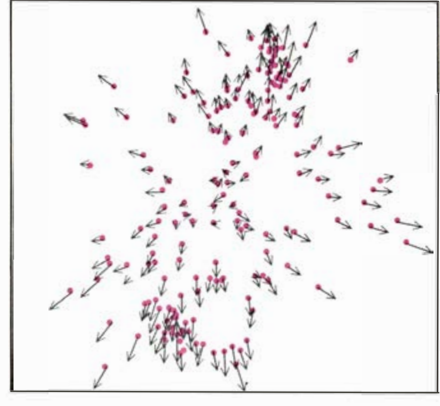
Cuando la energía de colisión está por encima del gigaelectronvolt por nucleón, se crean también hadrones más pesados que los piones. Un proceso importante es la transformación de un nucleón en una de las partículas denominadas resonancias N^*. Hay muchas partículas de este tipo, las cuales pueden ordenarse en series de masas progresivamente más altas. Todas comparten las propiedades básicas del protón y el neutrón y están integradas por los mismos quarks; indudablemente, pueden considerarse simples estados excitados, análogos a los estados excitados de un átomo, en que los quarks han tomado energía y momento angular adicionales.

A energías todavía más altas aparecen otros mesones y bariones. Se han descubierto cientos de variedades de hadrones con masas de hasta 10 GeV. En la mayoría de los casos, los hadrones de mayor masa se desintegran en unos 10^{-23} segundos; queda, pues, tiempo suficiente durante una colisión nuclear (que dura 10^{-22} segundos) para una serie repetida de ciclos de creación y desintegración. Para una energía determinada, se establece una distribución en equilibrio de hadrones de diferentes tipos y masas; la materia nuclear





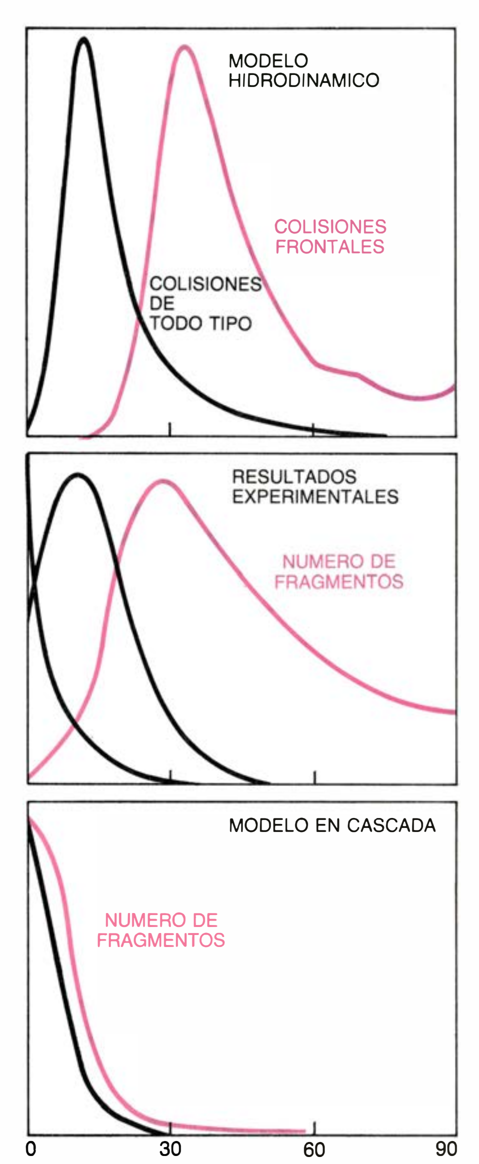




8. EL MODELO EN CASCADA de una colisión niobio-niobio calcula los caminos de cada nucleón. El modelo adopta la simplificación de que los nucleones sólo interaccionan en colisiones binarias. Como en el caso del modelo hidrodinámico (*esquemas precedentes*), hay una etapa inicial de compresión, seguida de otra de desintegración. Sin embargo, la distribución de fragmentos es más uniforme en el modelo en cascada. Los cálculos son originales de Joseph Molitoris, de la Universidad estatal de Michigan.

se convierte en materia hadrónica. Esto es lo que limita la temperatura en los experimentos de energías más altas. La energía de la colisión que, de no darse creación de hadrones, contribuiría a la energía cinética de los nucleones se transforma en masa de los hadrones excitados. En vez de producir partículas más rápidas, la colisión forma partículas más pesadas.

El de creación de materia hadrónica constituye un cierto tipo de cambio de fase y tiene su calor latente, igual que lo tiene el cambio de fase líquido-vapor. Cuando se calienta agua en fase líquida, la temperatura sube al principio y permanece luego constante a 100 grados mientras que el calor suministrado proporciona la energía necesaria para la evaporación; la subida de la temperatura se reinicia únicamente cuando toda el agua se ha convertido en vapor. La curva de temperaturas para la materia nuclear podría adquirir un perfil semejante. Con el calentamiento inicial, la temperatura subiría; posteriormente, el ritmo del incremento disminuiría, al convertirse los nucleones en hadrones de mayor masa; la temperatura se aproximaría asintóticamente a un valor máximo. El rápido incremento de la temperatura sólo podría reiniciarse cuando todas las partículas del sistema fueran hadrones de masa máxima.



9. DISTRIBUCION ANGULAR de los fragmentos emitidos. A ella se acude para distinguir el modelo hidrodinámico (*primer diagrama*) del modelo en cascada (*abajo*). El hidrodinámico produce muchos fragmentos cuyas direcciones forman ángulos agudos con el eje del haz; en el modelo en cascada, la emisión de los fragmentos es mucho más paralela al mismo. El contraste se hace más fuerte en las colisiones frontales, que producen un gran número de fragmentos a ángulos agudos con la dirección del haz (*curvas de color*). Los datos experimentales obtenidos con el "balón de plástico" del GSI-LBL apoyan el modelo hidrodinámico. Las colisiones frontales (*curva coloreada*) producen más de 50 fragmentos a ángulos muy agudos; otras colisiones dispersan de 40 a 50 fragmentos a un ángulo destacadamente pronunciado (*curva negra central*).

El inconveniente de esta formulación reside en la posible inexistencia del "hadrón de masa máxima". El número de tipos de hadrón crece exponencialmente, según parece, con la energía. Si esta tendencia continúa indefinidamente, los calentamientos posteriores nunca elevarían la temperatura de la materia por encima de la ya alcanzada en las colisiones de iones pesados. Sería una temperatura límite natural y absoluta. Esta idea fue introducida por Rolf Hagedorn, del CERN (el laboratorio europeo para la física de las partículas), quien sugirió que la temperatura límite era de unos $1,5 \times 10^{12}$ grados. Esta temperatura no es mucho más alta que la que ya se ha observado en los experimentos con iones pesados.

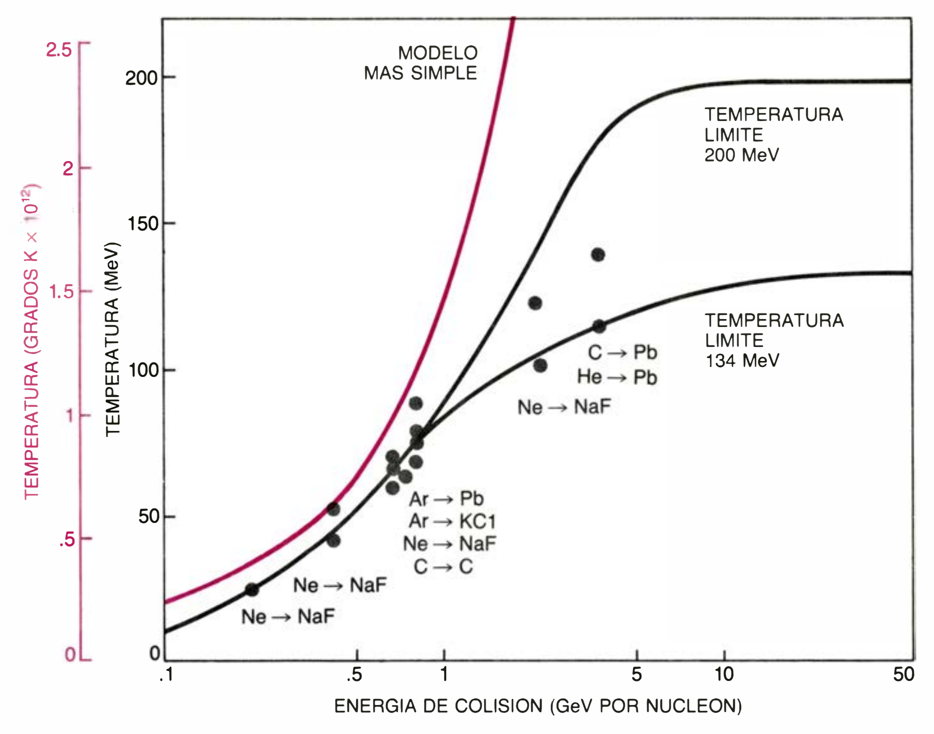
La última de las posibles fases de la materia nuclear se asemeja a un plasma de partículas cargadas. En ella, los nucleones y los hadrones de mayor masa pierden su identidad de partículas individuales. La materia de tales núcleos está formada por quarks y sus partículas coligantes: los gluones. A este plasma de quarks y gluones se le llama "quagma".

En el laboratorio, el modo habitual de conseguir un plasma común es calentar un gas hasta el punto en que las colisiones entre átomos desarrollan energía suficiente para despojarlos de sus electrones más externos. Los electrones están "desconfinados"; no se hallan ligados a ningún átomo particular, sino que vagan por el plasma. Se llega también al mismo resultado a través de otro método: el que opera en el interior de las estrellas. La extrema compresión de un gas puede inducir a una aproximación estrechísima entre los átomos, e incluso provocar que sus capas exteriores de electrones se superpongan. En estas condiciones, los electrones se encuentran también "desconfinados" (sueltos) y se mueven con libertad de un átomo a otro. Como en el caso de un sólido metálico, todos los átomos comparten un mar de electrones sueltos.

Entre el enlace de los electrones de un átomo y el enlace de los quarks de un hadrón media una diferencia importante. Podemos arrebatarle al átomo un electrón con un gasto de energía finito. Por contra, las fuerzas de atracción entre los quarks no pueden superarse, por mucha energía que suministremos. Las fuerzas crecen, sin límite alguno, a medida que se separan los quarks. Por esta razón, los quarks de un quagma no pueden considerarse realmente libres; simplemente han recibido una jaula mayor. En la formación de un quagma, la meta no es separar los quarks, sino acercar al máximo los hadrones, como en el segundo método antes mencionado para formar un plasma común. Cuando los hadrones se han acercado hasta superponerse, los quarks que los constituyen pueden vagar a través del volumen nuclear, igual que los electrones en un metal.

Una manera obvia de alcanzar la densidad de hadrones necesaria es comprimir la materia nuclear hasta provocar el contacto entre nucleones. A su vez, un calentamiento muy fuerte puede utilizarse también para crear un quagma, aunque no sea arrancando los quarks en colisiones violentas, vía esta a través de la cual se liberan los electrones en un plasma a alta temperatura. Se trata de un mecanismo más sutil: las temperaturas altas instan una copiosa producción de piones y otros hadrones que llenan todo el espacio existente entre los nucleones.

¿Con qué densidad deben comprimirse nucleones y hadrones para crear un quagma? ¿Cuál sería la energía del haz necesario para alcanzar esta densidad en las colisiones de iones pesados? Los autores y otros investigadores han estimado esos valores por métodos distintos. El más simple, quizá, procede de la observación que nos dice que los quarks se mueven libremente en el interior del hadrón. Si la densidad de toda una burbuja de materia nuclear pudiera elevarse a la densidad que existe dentro de un hadrón, los quarks deberían "desconfinarse", soltarse. La densidad crítica así calculada es de cuatro a ocho veces la densidad de la materia nuclear normal. Este



10. TEMPERATURAS MAXIMAS ALCANZADAS en las colisiones nucleares. Nos indican la creación de hadrones de gran masa y ponen de manifiesto una temperatura máxima natural que no puede superarse. De acuerdo con los cálculos teóricos más simples (*curva de color*) la temperatura debería crecer exponencialmente con la energía de colisión. Los datos experimentales están de acuerdo con esto hasta 0,5 GeV por nucleón; a partir de ahí el crecimiento de la temperatura es más lento que el esperado porque la energía que podría haber calentado el fluido nuclear se utiliza en la producción de hadrones de masa mayor. Si los hadrones pudieran tener tanta masa cuanta se quisiera, sería imposible alcanzar en colisiones núcleo-núcleo temperaturas superiores a cierto límite finito. Las temperaturas basadas en dos posibles valores límite (*curvas negras*) fueron calculadas por los autores. (Ilustración de Alan D. Iselin.)

grado de compresión debería alcanzarse fácilmente; de hecho, los experimentos con los aceleradores existentes, a una energía del haz de 1 GeV por nucleón, consiguen, a buen seguro, densidades de tres a cinco veces la densidad del estado fundamental.

Otras estimaciones de la densidad necesaria para la formación del quagma están de acuerdo con las mencionadas. Por eso parece que la energía de colisión que se requiere apenas trascienda el alcance de los aceleradores actuales. Una máquina que acelerase los núcleos más pesados a una energía de 10 a 100 GeV por nucleón permitiría investigar las propiedades del quagma. Máquinas de este tipo se encuentran en fase de ejecución en anteproyecto en distintos laboratorios: CERN, Dubna, GSI, Brookhaven y LBL.

Algunas de las preguntas más interesantes que podrán plantearse en el trabajo con las nuevas máquinas tendrán que estar relacionadas con la desintegración del quagma. Cuando la densidad cae por debajo del nivel crítico, los quarks deben reagruparse para formar hadrones, pero se conoce muy poco acerca de este proceso, ni siquiera desde el punto de vista teórico. El mecanismo de reagrupación podría revelar mucho sobre la naturaleza de las fuerzas entre los quarks. Tal vez un quark con gran momento lineal escape del quagma atrayendo a otros consigo para así constituir un hadrón. Podrían crearse espontáneamente parejas de quarks y antiquarks en la estela de un quark en fuga, apareciendo finalmente como flujo de mesones. Alternativamente, toda la masa del quagma podría separarse, o fragmentarse, en racimos de quarks. Algunos racimos de esos representarían formas no usuales de materia hadrónica.

Hasta ahora, las propiedades de los quarks se han estudiado solamente en las interacciones de hadrones individuales, donde el número de quarks presentes está estrictamente limitado. Las colisiones de iones pesados ofrecen la posibilidad de observar interacciones en las que toman parte gran número de quarks. Por el hecho de estar formado por varios centenares de quarks y gluones el quagma puede estudiarse como una forma de la materia y no ya como un conjunto de partículas independientes. Se trata de la forma de la materia con la que empezó el universo su andadura; por ello, las reacciones de los iones pesados con energías muy altas podrían reconstruir, a escala, la evolución primitiva del mismo.

Fiabilidad de las memorias de ordenador

Los ordenadores de gran tamaño, que contienen centenares de pastillas de silicio, se hallan expuestos a múltiples fallos, a menos que se tomen las oportunas medidas correctoras. Estas son de índole matemática

Robert J. McEliece

Todos los ordenadores modernos, desde el microordenador más modesto hasta los mayores superordenadores, poseen memorias electrónicas formadas por pastillas de silicio. La fiabilidad de esta tecnología es muy alta: en principio, cabe esperar que una pastilla de memoria funcione sin fallos durante décadas. Sin embargo, cuando en la memoria de un gran ordenador se combinan centenares o millares de pastillas, alguna de ellas puede fallar a las pocas horas de funcionamiento. En los ordenadores utilizados en los negocios o en la ciencia, esa posibilidad resulta sencillamente inaceptable.

La solución de este problema arranca de la matemática y se conoce como código de corrección de errores. Esta técnica garantiza el funcionamiento perfecto de una memoria dada, incluso después de haberse producido centenares de errores. De hecho, el tiempo medio transcurrido hasta que la memoria sufre tantos errores que el código se muestra incapaz de superarlos es del orden de muchos años. El código convierte una memoria con un bajo nivel de fiabilidad en otra altamente fiable; por tanto, su utilización en la construcción de memorias grandes y seguras resulta de todo punto necesaria.

¿Cómo se producen los errores? Una pastilla de memoria consiste en una matriz cuadrada de celdas de almacenamiento de datos. La versión más popular es la pastilla de 64K, donde la K, abreviatura de kilo-, no significa 1000 sino 2^{10}, es decir, 1024 (la potencia de dos más próxima). La pastilla de 64K almacena 65.536 bits, o dígitos binarios, de datos. El precio de esta pastilla es de unas ochocientas pesetas. La pastilla de 256K, capaz de almacenar un número de datos cuatro veces mayor, está reemplazando actualmente la anterior. Se empieza a hablar ya de pastillas de un megabit (un megabit equivale a 2^{20}, es decir 1.048.576 bits). En las pastillas de 64K, la matriz de las celdas de almacenamiento de datos es de 256 por 256. Cada celda almacena un bit, es decir, un 0 o un 1, que constituyen el alfabeto básico de dos letras mediante el cual se codifica la información en todos los ordenadores.

El acceso a la pastilla es aleatorio; en otras palabras, el contenido de cada celda puede ser almacenado o "escrito", y recuperado, o "leído", individualmente. Para cumplir este propósito, cada celda tendrá una dirección única. La dirección consta de dos partes: la dirección de la fila, formada por un número binario que identifica la situación horizontal de la celda en la matriz, y la dirección de la columna, integrada por un número binario que identifica la situación vertical de la celda. Las filas y las columnas están numeradas empezando por el 0; en consecuencia, la dirección mayor en una pastilla de 64K corresponde a la celda situada en la fila 255 y en la columna 255. El equivalente binario de 255 es 11111111, una secuencia de ocho bits; para especificar las direcciones de las filas y de las columnas en pastillas de 64K se necesitan ocho bits en cada caso, es decir, 16 bits en total. Las pastillas de 256K poseen 512 filas y 512 columnas; por tanto, para situar una celda se necesitan 18 bits. La pastilla de un megabit (cuando llegue) tendrá 1024 filas y 1024 columnas y necesitará direcciones de 20 bits.

Los ceros y los unos almacenados en la memoria de una pastilla quedan representados por la presencia o ausencia de una carga eléctrica negativa en los lugares del cristal de silicio cuyas propiedades eléctricas los han convertido en pozos de potencial, trampas electrónicas para las cargas negativas. Cuando en una celda determinada se ha almacenado un cero, el pozo de potencial en dicho lugar se llena con electrones; cuando se almacena un uno, el pozo se vacía de electrones. Cuando se lee la celda, se mide su carga negativa. Si la carga supera un cierto valor, el bit almacenado se torna en un 0; en caso contrario, dicho bit se considera un 1.

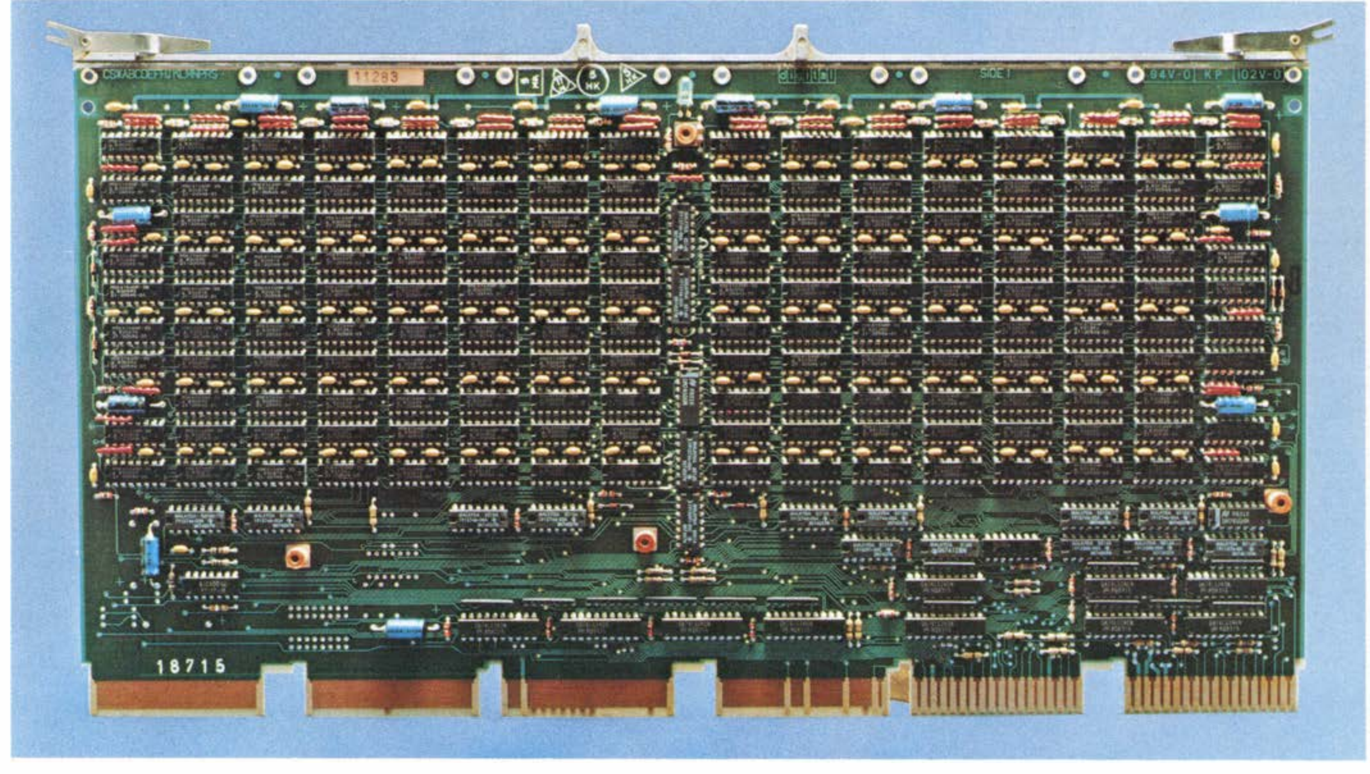
Si un pozo de potencial perdiera accidentalmente su carga, o si otro descargado ganara accidentalmente una carga, el bit almacenado sería erróneo. Tarde o temprano, estos contratiempos ocurren. En los denominados errores duros, se daña la pastilla misma. Una celda puede convertirse en no fiable, permaneciendo en el 0, en el 1 o cambiando erráticamente entre 0 y 1. Un defecto en los circuitos de dirección provoca que el dato de una fila o columna pierda su fiabilidad. Se ha comprobado que llega a estropearse la mitad de una pastilla, e incluso una pastilla entera. En los errores denominados blandos, la pastilla sufre un daño transitorio. En este caso, el responsable suele ser una partícula alfa, es decir, un núcleo de helio (constituido por dos protones y dos neutrones) emitido en la desintegración radiactiva de un núcleo atómico pesado.

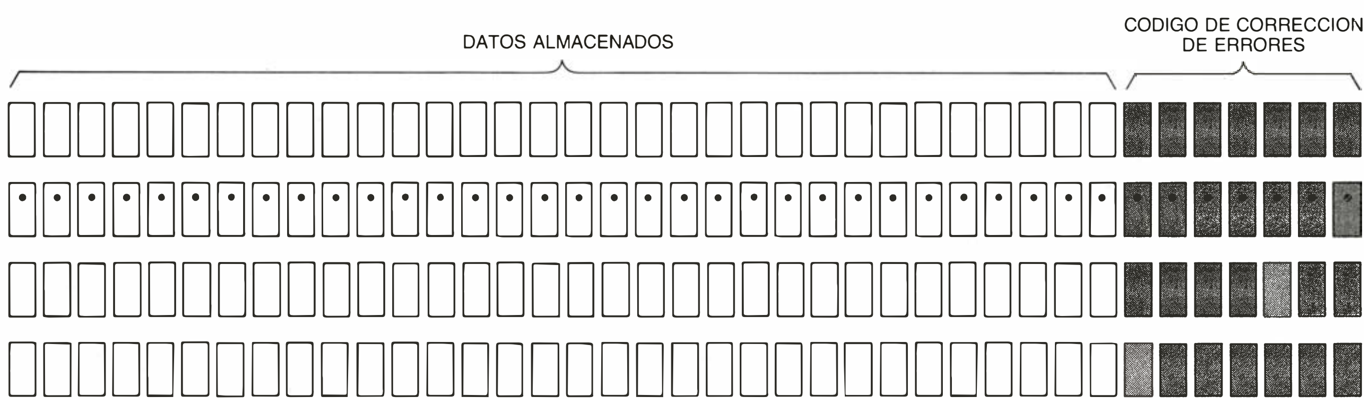
La presencia, desgraciadamente habitual, de partículas alfa en las memorias de los ordenadores débese a las pequeñas cantidades de núcleos radiactivos que hay en casi todos los materiales. En particular, en el plástico que envuelve una memoria normal se encuentran átomos de uranio y torio. En consecuencia, las pastillas se ven sometidas a un bombardeo constante de partículas alfa; cuando una de éstas, dotada de cierta energía, penetra en un pozo de potencial, desaloja a los electrones de su posición en la red del cristal de silicio. Estos electrones pueden ser atraídos hacia los pozos de potencial cerca-

nos. Si un pozo determinado está prácticamente lleno de electrones (es decir, si hay un 0 almacenado en él), el hecho no le acarrea ningún problema. Pero si el pozo de potencial está vacío (es decir, si hay un 1 almacenado en él) puede producirse un error: el uno puede convertirse en un falso cero.

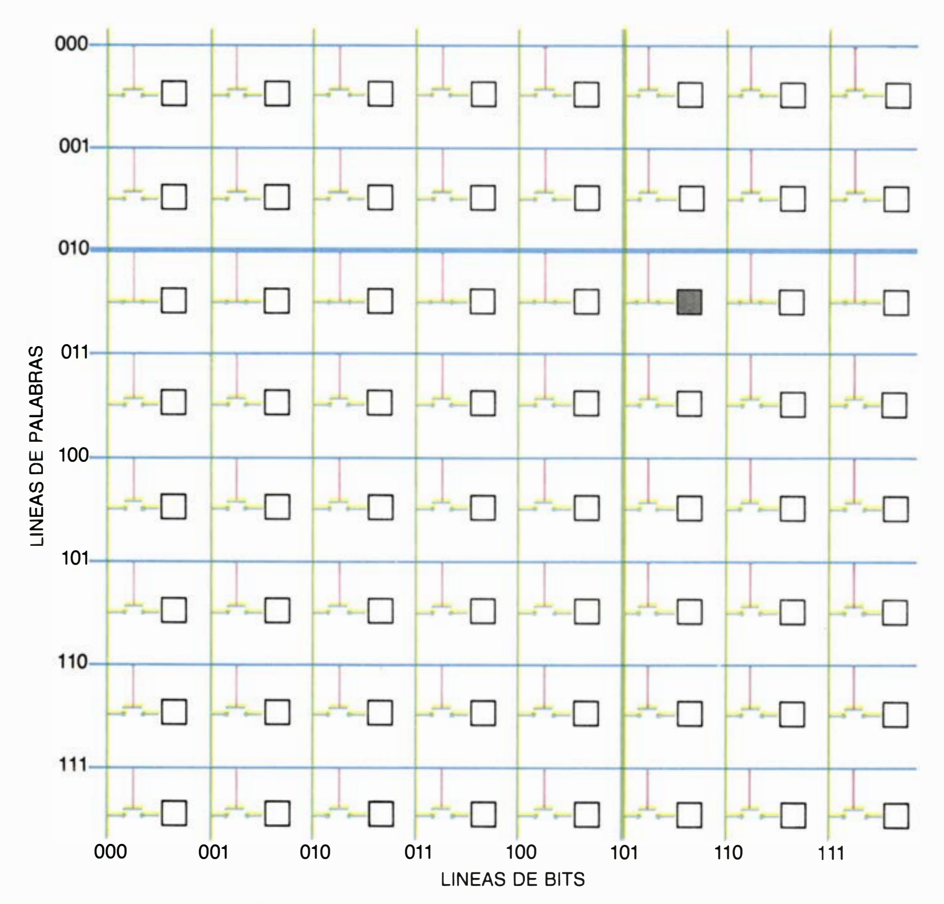
¿Cómo hace frente a esta situación un sistema de corrección de errores? El siguiente análisis, referido a una memoria imaginaria de un megabyte, constituida por 128 pastillas de 64K, nos da la respuesta. En una memoria de este tipo, esas pastillas se organizan en cuatro filas de 32 pastillas cada una; por contener cada una 65.536 celdas de memoria, la memoria de un megabyte poseerá un total de 8.388.608 celdas. (Para los ordenadores existentes en la actualidad, este número es bastante pequeño.) Los datos están divididos en "palabras" de 32 bits cada una. Cada palabra está constituida por el contenido de una celda de memoria de cada una de las 32 pastillas de una de las filas.

¿Durante cuánto tiempo puede funcionar esta memoria sin que se produzcan fallos? Mucho antes de que se entrara en la era de los ordenadores, los estadísticos introdujeron la noción de tiempo medio anterior a un fallo, es decir, el tiempo que transcurre, por término medio, hasta que falla un mecanismo que venía operando correctamente. Por fortuna el tiempo medio de fallo para una celda de memoria de una pastilla de 64K es dilatado. Los resultados obtenidos en experimentos de laboratorio (en los que se tienen en cuenta solamente los errores blandos) sugieren que un valor típico de este tiempo medio podría superar al millón de años. Sin embargo, como hemos señalado antes, la memoria de un ordenador pueden formarla millones de celdas de memoria; en consecuencia, un tiempo medio real de fallo resulta peligrosamente bajo. Para ilustrar este razonamiento, supongamos que el tiempo medio de fallo de una celda de memoria dure un millón de años. Lo que significa que el tiempo medio de fallo por una memoria de un megabyte es de un millón de años dividido por 8.388.608,

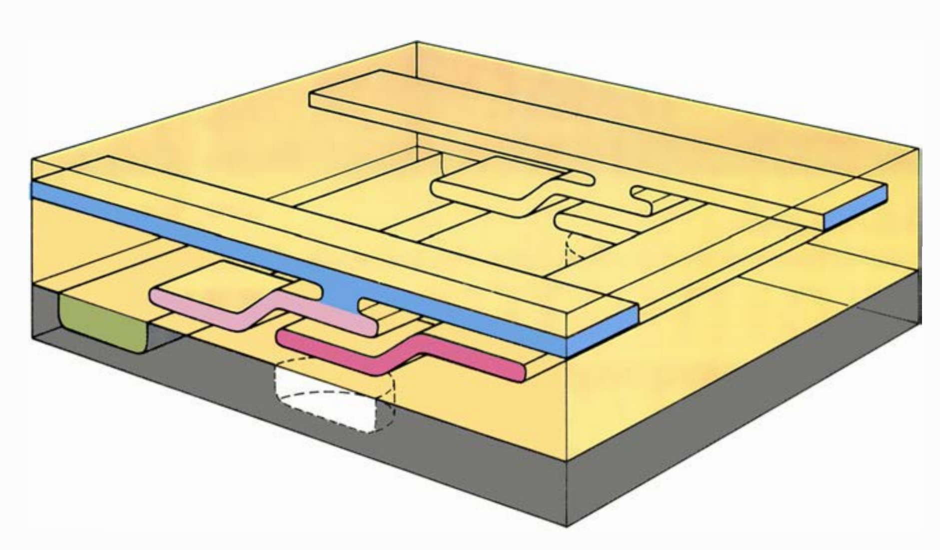




1. EN UNA MEMORIA DE UN MEGABYTE se almacenan 2^{23} dígitos binarios de datos (8.388.608 dígitos) en pastillas de silicio; estas pastillas llenan los dos tercios superiores de la placa del circuito de memoria (*fotografía superior, tomada por Robert Paz*). Cada pastilla tiene una capacidad de 64K: almacena 2^{16}, o sea, 65.536 bits. Las pastillas se disponen, físicamente, en 10 filas y 16 columnas. Cuatro de las posiciones no están ocupadas por una pastilla, sino por un condensador (*cilindros de color azul*). Electrónicamente, las pastillas se ordenan en cuatro filas y 39 columnas (*dibujo inferior*). La memoria organiza los datos en unidades de palabras; cada palabra está formada por 32 bits y requiere una celda de memoria (*puntos negros*) en cada una de las 32 pastillas. Las cuatro filas restantes de siete pastillas cada una (*en gris*) se reservan al almacenamiento de bits para la corrección de errores. Las pastillas situadas en la parte inferior del circuito se destinan a ciertas funciones auxiliares, de las que destacaríamos la comunicación y el control temporal.



2. UNA PASTILLA DE MEMORIA se organiza en forma de matriz de celdas de memoria. Cada celda es accesible al ordenador; los bits individuales se pueden, así, almacenar o recuperar. La presente figura muestra una matriz de ocho por ocho celdas; en una pastilla de 64K, la matriz es de 256 por 256. La matriz es cuadrada, disposición que minimiza el cableado necesario. Para acceder a una celda, las señales se dirigen a través de dos conductores que se cruzan en dicha celda. En esta figura, la dirección de la fila 010 se utiliza para activar una línea de palabras (*azul*); esto cierra las puertas de la fila. La dirección de la columna 101 se utiliza, entonces, para activar una línea de bits (*verde*) y la línea de bits "lee" el contenido de una celda (*gris*) mediante la carga eléctrica existente en ésta. También puede "escribir" un bit.



3. CELDA DE MEMORIA INDIVIDUAL en una pastilla de silicio (sección transversal esquemática). Un electrodo (*rojo oscuro*) con una carga positiva permanente crea un "pozo de potencial" (*blanco*) –de hecho, una trampa para electrones– en la red cristalina del silicio situada en la celda (*gris*). El silicio es un semiconductor de tipo *p*, en el que, en condiciones normales, no existen electrones libres. La línea de palabras que llega a la celda (*azul*) es una lámina metálica aislada por óxido (*marrón*). La línea de bits que llega a la celda es de silicio de tipo *n* (*verde*), un semiconductor en el que sí existen electrones libres.

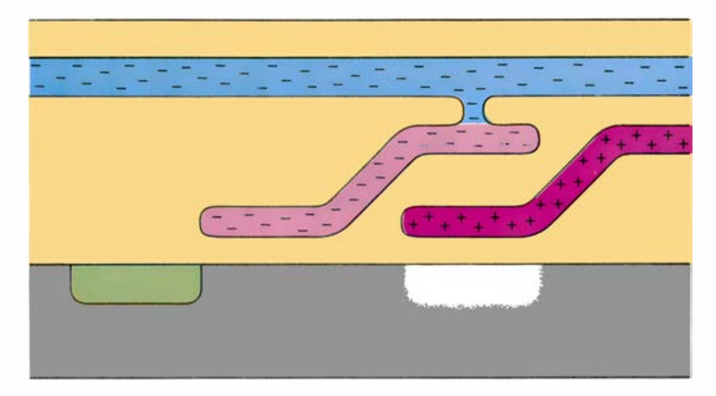
es decir, de unos 43 días, aproximadamente. Este tiempo es brevísimo, y la posibilidad de apantallar la memoria de un ordenador frente a las partículas alfa está descartada por motivos económicos.

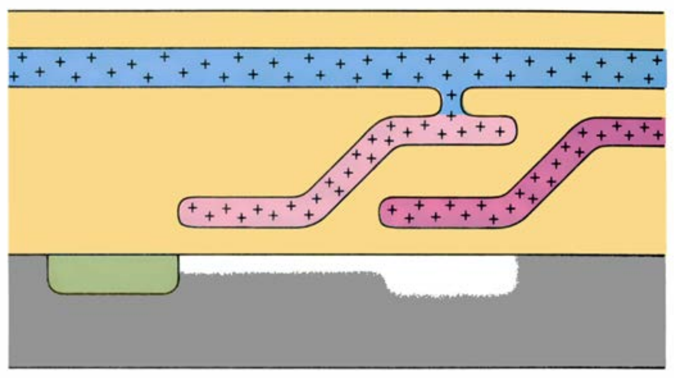
La solución de este problema la proporcionaron los matemáticos, quienes, urgidos por la necesidad de disponer de sistemas de telecomunicación refinados, descubrieron hace más de 30 años que, en algunos casos, era mejor corregir los errores que tratar de evitarlos. Un ejemplo a pequeña escala nos permitirá comprender esta estrategia. Supongamos que se quiere almacenar cuatro bits de datos –por ejemplo, 1110– en una memoria que sabemos propensa al error. Para representar la memoria utilizaremos un diagrama de Venn consistente en tres círculos que se intersecan mutuamente [*véase la figura 6*]. Estos diagramas se emplean en matemáticas para representar relaciones entre conjuntos. Los tres círculos en intersección forman un total de siete compartimientos.

Procedamos ahora a asignar los bits a los cuatro compartimientos más internos del diagrama. Los tres restantes los llenaremos con los denominados bits de paridad. La regla para generar estos bits de paridad dice que el número total de los existentes en cada círculo será par. Por ejemplo, el círculo *A*, en la parte superior izquierda del diagrama de Venn, incluye como datos tres 1. En consecuencia, el bit de paridad en el círculo *A* será un 1. Cuando el proceso termina, cada compartimiento contiene un bit. Los siete bits forman una palabra de clave; el procedimiento para producir la palabra de clave, a partir de la palabra de dato de cuatro bits, se denomina algoritmo de codificación.

Si un bit de la palabra de clave sufre ahora un error, es decir, si una partícula alfa cambia un bit de un 1 a un 0, el error se detecta enseguida. Basta comprobar los bits de paridad. En el ejemplo representado en la figura, los bits ponen de manifiesto que algo está mal en el círculo *A* y en el *C*, pero no en el círculo *B*. Uno y solamente uno de los siete compartimientos tiene la propiedad de estar en *A* y *C*, pero no en *B*. Por consiguiente, el bit en ese compartimiento está cambiado. De este modo el error puede corregirse. El procedimiento descrito se llama algoritmo de decodificación.

Se trata de un procedimiento limitado, evidentemente. Sólo tiene éxito cuando la palabra de clave ha sufrido





4. LECTURA O ESCRITURA DE DATOS en una celda de memoria individual. Se produce cuando la línea de palabras le cierra la puerta a la celda, estableciendo una comunicación entre la celda y su línea de bits. En la figura de la izquierda, la línea de palabras está cargada negativamente. Por tanto, la puerta se encuentra abierta. En la figura de la derecha, la línea de palabras está cargada positivamente. En consecuencia, la puerta está cerrada: la carga se extiende por el pozo de potencial, permitiendo la comunicación entre la celda y la línea de bits. Así se detecta o ajusta la carga existente en la celda.

a *a′*

b *b′*

c *c′*

5. LOS ERRORES "BLANDOS" afectan a la fiabilidad de un bit almacenado sin dañar la pastilla de memoria. Se representa aquí una de las causas de estos errores. Un bit se ha almacenado en forma de carga o ausencia de carga: un 0 está representado por la existencia de electrones en una celda (*a*); un 1 está representado por su ausencia de ellos (*a′*). Entonces, se produce el error. Una impureza radiactiva del plástico que recubre la pastilla emite una partícula alfa (un núcleo de helio), cuyo paso a través de la pastilla desaloja los electrones de sus posiciones en la red cristalina del silicio (*b, b′*). En el caso de un 0, este hecho no supone ningún problema (*c*). En el caso de un 1, los electrones atraídos hacia el electrodo colocado sobre la celda dan lugar a un cero erróneo (*c′*). Se producen también errores "duros": el daño en los circuitos de direccionamiento pueden afectar a regiones amplias de una pastilla.

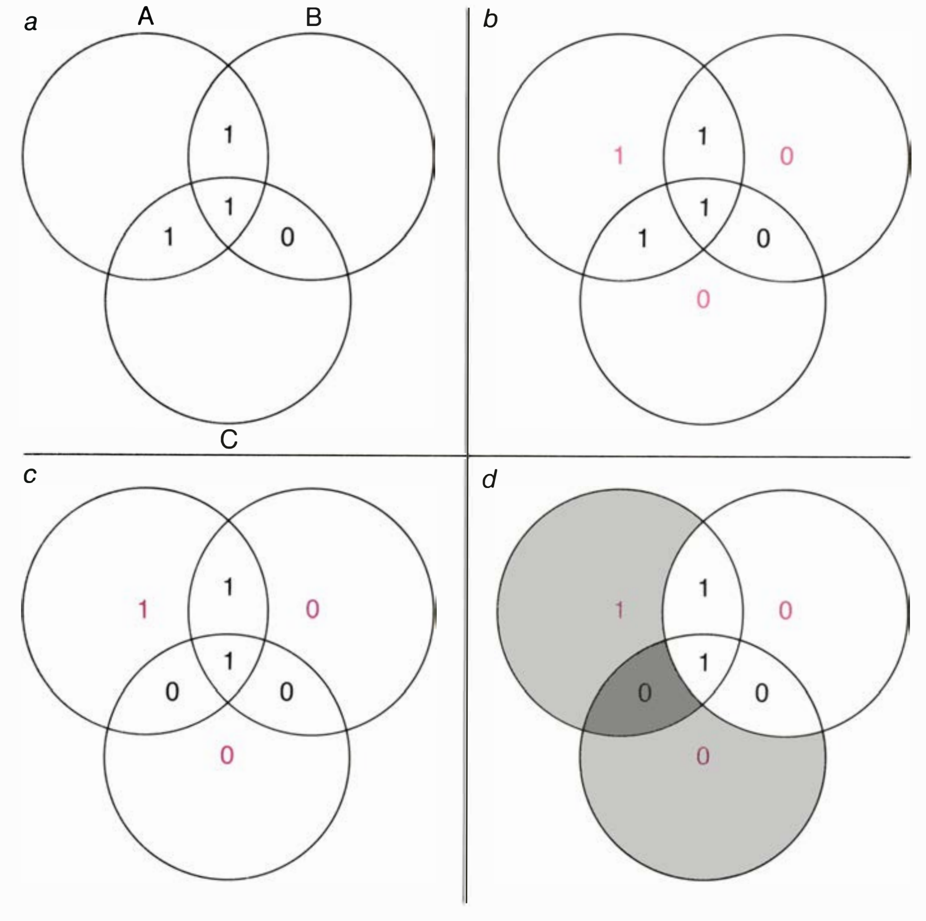
un error. Si se producen dos o más errores, el procedimiento no resulta válido. De hecho, si se producen dos errores, el diagnóstico del algoritmo de decodificación será incorrecto (tratará el problema como si sólo hubiera un error) y, en su esfuerzo para arreglar la situación, la empeorará, introduciendo un tercer error. Este comportamiento indeseable se puede corregir, aunque sólo parcialmente, por medio de un bit de paridad adicional, exterior a los círculos que se intersecan [*véase la figura 7*]. El bit adicional se escoge de forma tal que el número total de bits a lo largo del diagrama sea par. En consecuencia, el algoritmo de decodificación no puede corregir los errores dobles, pero sí descubrir que algo está mal y no producir daños adicionales.

La técnica que estamos describiendo fue descubierta, en 1948, por Richard Hamming en los laboratorios Bell Telephone y, en su honor, se la conoce como código de Hamming. En particular, el esquema en el cual cada palabra de clave de siete bits protege a cuatro bits de datos es el código de Hamming (7,4); el esquema que requiere un bit de más es el código de Hamming (8,4). Existen otras muchas variedades: el código (15,11), el (16,11), el (32,26), el (64,57), el (128,120), etcétera. Aunque estos códigos no se pueden representar fácilmente con diagramas de Venn, se introducen sin mayor dificultad en los ordenadores digitales de alta velocidad.

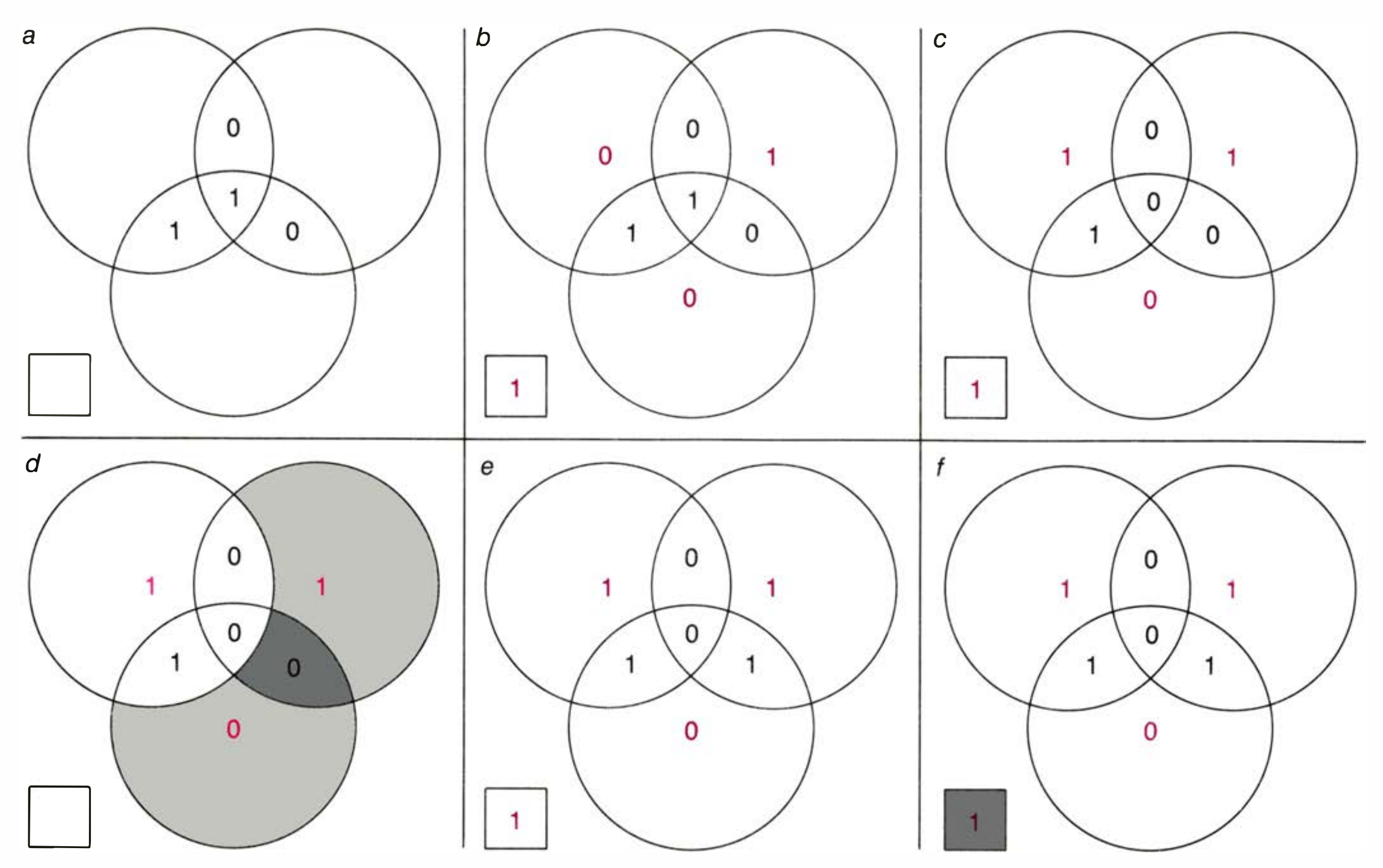
Vamos a volver ahora al problema de la fiabilidad de una memoria de un megabyte. La utilización de un código de Hamming para corregir los errores significa que una memoria real de un megabyte no puede consistir sólo en 128 pastillas de 64K. Una disposición más razonable utiliza 156 pastillas. Como antes, la memoria organiza los datos en palabras. Sin embargo, cada palabra está formada ahora por 39 bits, en lugar de 32. Los siete bits adicionales de cada palabra son bits de paridad. Son inaccesibles para el usuario del ordenador, quedando reservados para el código de corrección de errores. El esquema utilizado es el código de Hamming (64,57). Los siete bits de paridad pueden proteger 57 bits en palabras de clave de 64 bits. Sin embargo, los arquitectos de los modernos ordenadores han optado por un sistema de palabras de 32 bits. Por tanto, los bits de paridad protegen menos bits de datos de los que podrían.

¿Cuánto más fiable es una memoria provista de un código de corrección de errores respecto a una memoria que no lo posea? Por una parte, el aumento del número de celdas de memoria para acomodar los bits de paridad implica que los errores ocurren más frecuentemente: el tiempo medio antes de que se produzca un fallo se reduce a un 32/39 de su valor original, un tiempo de 35,7 días. Por otra parte, cada palabra de clave de 39 bits puede tolerar ahora un solo error en cualquiera de sus bits. Por tanto, la memoria falla cuando alguna palabra de clave ha sufrido dos errores, pero no antes. En particular, el primer error no causa problemas; este error se puede corregir allí donde se produzca. El segundo error no causa problemas, a menos que ocurra en una palabra de clave que ya contenga un error. El tercer error no causa problemas, a menos que afecte a la primera o la segunda palabra de clave ya dañadas previamente, y así sucesivamente. Puesto que la memoria incluye 262.144 palabras de clave, es probable que transcurra mucho tiempo antes de que alguna palabra de clave resulte afectada dos veces.

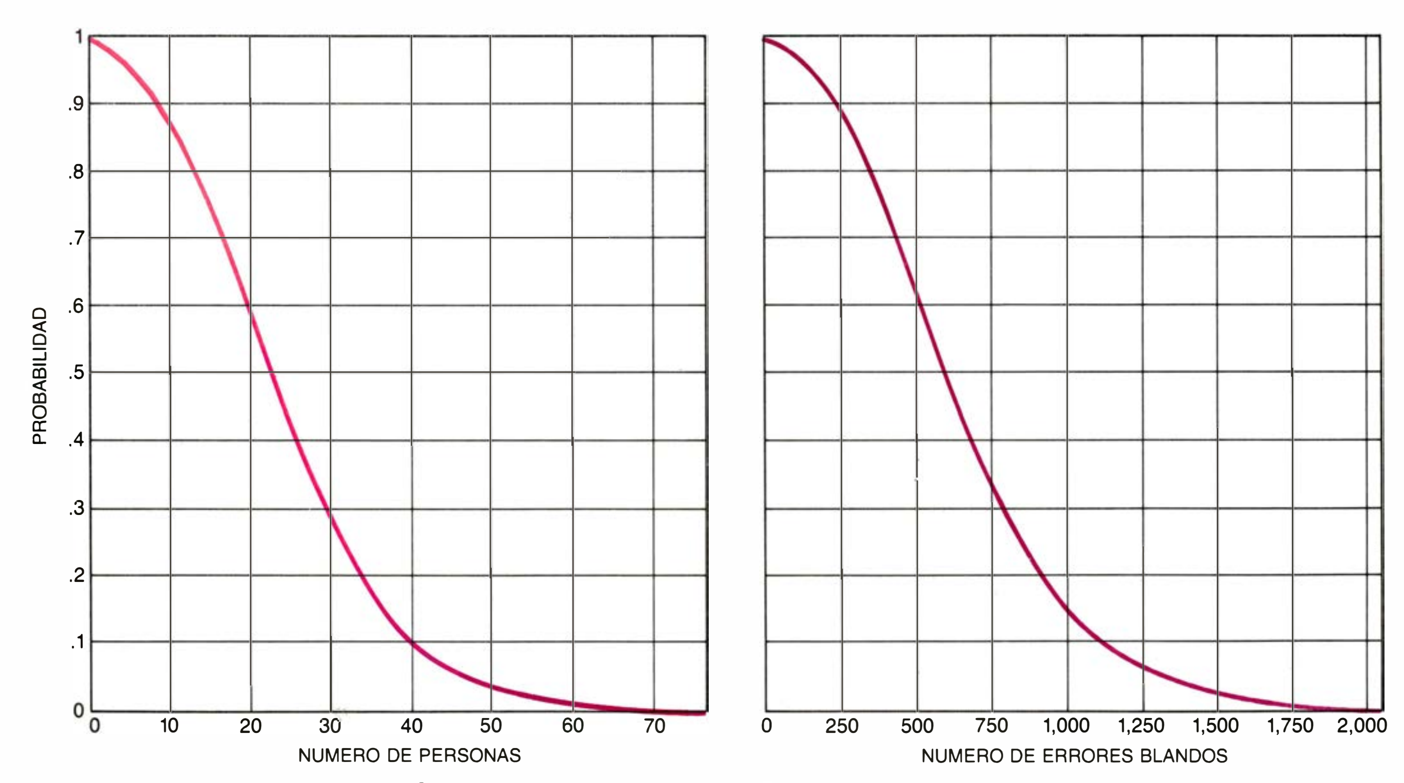
¿Cuánto tiempo? Esta pregunta tuvo su respuesta, hace ya algún tiempo, en un contexto completamente diferente. Consideremos una memoria de ordenador que sólo almacene 365 palabras. Supongamos, además, que esas palabras estén etiquetadas con los días del año, del 1 de enero al 31 de diciembre. Para simular la ocurrencia aleatoria de errores en esta memoria, vamos a llevar a cabo un experimento que consiste en entrevistar a cierto número de personas y señalar los errores de acuerdo con el día de su cumpleaños. Por ejemplo, si nos encontramos con una persona cuyo cumpleaños es el 28 de abril, asignaremos un error a la palabra del ordenador que corresponda al 28 de abril. La memoria fallará en cuanto coincidan dos cumpleaños. Los teóricos del cálculo de probabilidades han demostrado que se necesita entrevistar un promedio de sólo 24,6 personas antes de encontrar a dos cuyo cumpleaños se celebre el mismo día. Este hecho sorprendente se conoce como la paradoja del cumpleaños sorpresa. De aquí se deduce que



6. CODIGO DE HAMMING (7,4), el más sencillo de los procedimientos de corrección de errores desarrollados por Richard Hamming. Este método se utiliza para proteger los datos en las memorias. El código (7,4) necesita tres bits de paridad para proteger cuatro bits de datos. La representación conocida como diagrama de Venn ilustra el fundamento de este método. Cuatro bits de información están alojados en los cuatro compartimientos centrales del diagrama (*a*). A continuación (*b*), se almacenan tres bits de paridad (*color*). El método consiste en imponer que el número total de 1 en cada círculo sea par. Un error blando cambia uno de los bits de datos (*c*). El error se detecta reexaminando los bits de paridad, que ponen de manifiesto (*d*) que algo está funcionando mal en el círculo *A* y en el *C*, pero no en el círculo *B*.



7. CODIGO DE HAMMING (8,4). Utiliza un bit de paridad adicional. Este código permite que el ordenador detecte la ocurrencia de errores dobles, aunque no los corrige. Se almacenan cuatro bits de datos en los compartimientos centrales de un diagrama de Venn (*a*). Tres bits de paridad (*color*) se colocan en los compartimientos externos (*b*). A continuación, se añade un bit de paridad adicional (*cuadrado*). Se impone la condición de que el número total de 1 en el diagrama sea par. Se producen dos errores blandos (*c*). Bajo esta circunstancia, el procedimiento de comprobación transcurre por mal camino (*d*) y empeora el problema creando un tercer error (*e*). El bit de paridad extra está ahora en error (*f*). La secuencia entera de bits se califica así de no fiable.



8. SIRVE LA PARADOJA DEL CUMPLEAÑOS para predecir la fiabilidad de la memoria de un ordenador protegida por un código Hamming. La figura de la izquierda muestra la probabilidad de que las fechas de los cumpleaños de un número determinado de personas sean diferentes. En un grupo de 40 personas, la probabilidad de que no se duplique un cumpleaños es del 11 por ciento. La figura de la derecha muestra la probabilidad de que la memoria de un ordenador de 256K funcione a pesar de la producción de errores de una sola celda. Los errores de una sola celda son contrarrestados por un código Hamming; la memoria falla cuando se producen dos errores en una "palabra". Las dos curvas de probabilidad responden a una misma fórmula.

una memoria de 365 palabras tolera un promedio de 24,6 errores antes de fallar.

Como es natural, este resultado se refiere a un total de 365 cumpleaños posibles. Los matemáticos calcularon hace tiempo los valores correspondientes para un número arbitrario de posibles cumpleaños. El resultado de estos cálculos se expresa mediante una ecuación bastante complicada. Más aún, en un planeta con un año de N días, el número medio de habitantes que se tendrían que entrevistar antes de encontrar a dos con el mismo cumpleaños viene dado, aproximadamente, por la raíz cuadrada de ($\pi/2 \times N$). Ahora ya podemos determinar el tiempo medio transcurrido antes de que se produzca un fallo en una memoria de un megabyte protegida por un código de corrección de errores. Esta memoria no consta de 365 palabras, sino de 262.144; en consecuencia, dicha memoria tolerará un promedio de 642 errores. Si se produce un error cada 35,7 días, el tiempo medio antes de fallar será igual a 642 × 35,7 días: unos 63 años.

En ausencia de un código de corrección de errores el tiempo medio transcurrido sin que se produzcan fallos es de unas pocas decenas de días; con el código, dicho tiempo se alarga algunas decenas de años. Esta diferencia pone de manifiesto el extraordinario poder del código de corrección de errores. Para estar seguros, al analizar la fiabilidad de las memorias de ordenador se han considerado sólo errores "blandos" en celdas únicas. Los errores "duros" desempeñan también un papel importante en la determinación del tiempo medio transcurrido antes de que se produzcan fallos. Los errores duros pueden analizarse también mediante la "teoría del cumpleaños". La existencia de estos errores no altera en modo alguno la conclusión de que el código de corrección es fundamental para la construcción de memorias fiables.

La teoría de la codificación, una disciplina matemática desarrollada a finales de los años cuarenta, en respuesta a las necesidades de la industria de telecomunicaciones, ha encontrado una aplicación actual inesperada en la fabricación de ordenadores. Por otra parte, el análisis de las ventajas que ofrece el código de corrección de errores para las memorias de los ordenadores se ha beneficiado de la teoría del cumpleaños, un aspecto de las matemáticas puras, es decir, de las matemáticas "poco prácticas". Todos estos ejemplos ponen claramente de manifiesto el valor de la investigación fundamental.

Natación por propulsión a chorro en el calamar

Para nadar, los calamares toman agua y la expulsan contrayendo los músculos radiales y circulares de la pared del manto, que carece de huesos. "Resortes" elásticos de colágeno insertos en el músculo aumentan la potencia del chorro

John M. Gosline y M. Edwin DeMont

Los animales que corren, nadan o vuelan más deprisa, o más lejos, son vertebrados e insectos. Cabe atribuir sus proezas locomotoras a la posesión de esqueletos rígidos, constituidos por materiales duros, como hueso o cutícula; soportan éstos las contracciones musculares que, por mediación de articulaciones flexibles, se transforman en movimientos ordenados. Los animales de cuerpo blando, cuyo sostén esquelético deriva de la presión hidrostática, suelen carecer, en cambio, de la potencia muscular que permite un movimiento rápido prolongado; muchos de ellos son sedentarios.

Los calamares (cefalópodos) constituyen una excepción notable. Nadan tan bien como muchos peces, pero lo hacen por propulsión a chorro: absorben agua hacia el interior de su cavidad paleal, cilíndrica, a través de aberturas situadas a cada lado de la cabeza, y la expulsan a alta presión por un sifón. Esa técnica natatoria vale tanto para desplazamientos a gran velocidad como para recorrer distancias que exijan gran resistencia. El calamar japonés *Todarodes pacificus* migra a lo largo de 2000 kilómetros, nadando continuamente durante dos meses y medio a una velocidad media de 0,3 metros, equivalentes a 0,9 longitudes del cuerpo, por segundo. En distancias cortas se han cronometrado velocidades de tres metros por segundo en algunos calamares, y se cree que ciertas especies grandes avanzan con triple rapidez. Calamares muy pequeños, como las larvas de *Loligo vulgaris*, son capaces de esfuerzos explosivos, en los que recorren, en un segundo, una distancia equivalente a 25 longitudes del cuerpo. Con una rápida secuencia de contracciones, los calamares salen huyendo del depredador, acelerando y dejando detrás sólo una nube de tinta.

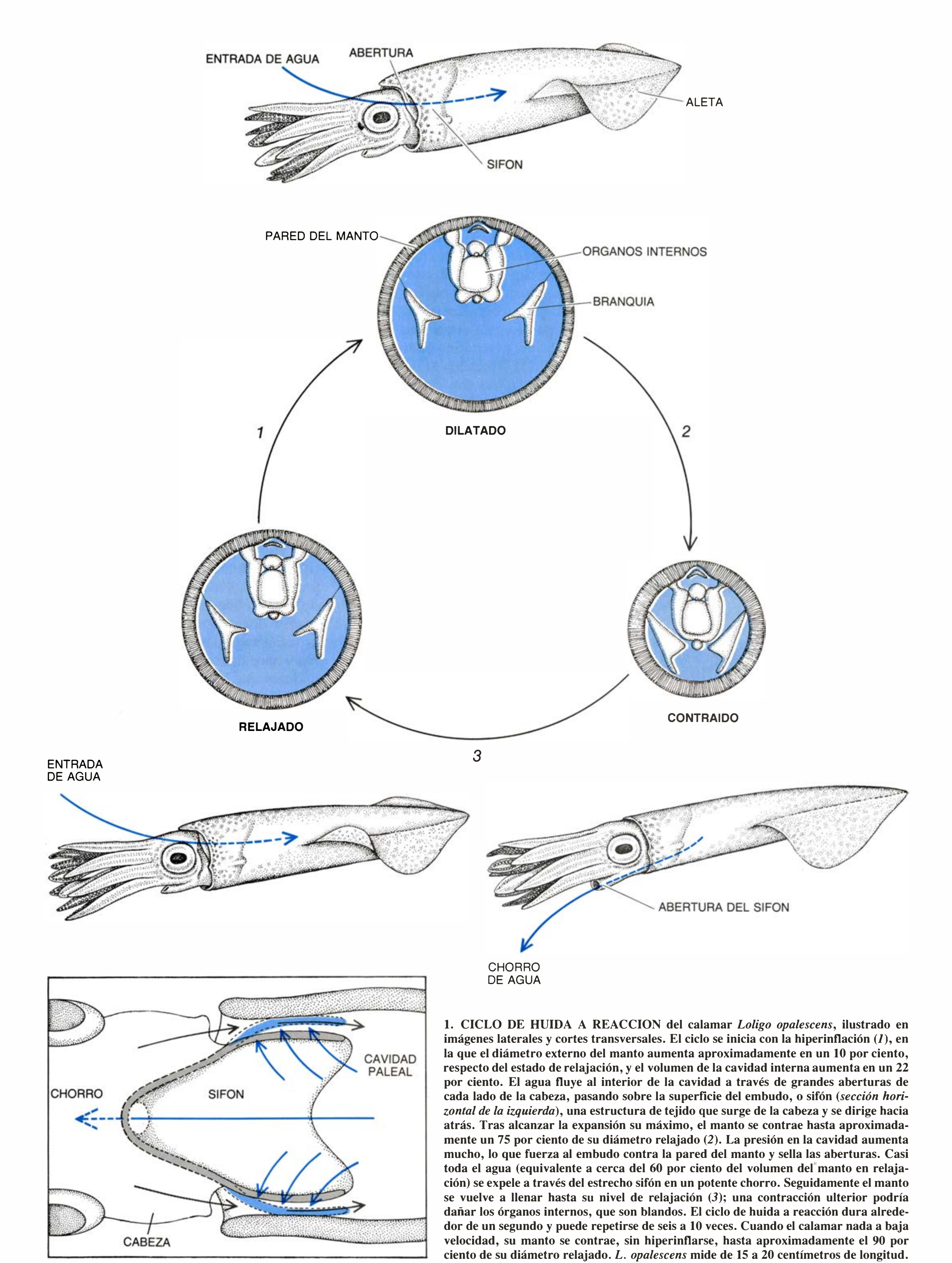
También pueden caer prestamente sobre una presa. Los calamares son activos cazadores; se apoya su modo de vida en la posesión de características fisiológicas más parecidas a las de los peces que a las de otros moluscos, como gasterópodos o bivalvos. Poseen un complejo sistema nervioso central y ojos casi tan desarrollados como los de los humanos. Una circulación cerrada a alta presión y un sistema respiratorio bien desarrollado les permiten mantener la elevada tasa metabólica precisa para desplazarse a chorro. A igualdad de condiciones no sorprende, por tanto, que los calamares compitan bien con los peces.

No le merma ello interés a que lo logren sin aprovecharse de las ventajas de un esqueleto vertebrado. Los huesos del esqueleto de un vertebrado son estructuras rígidas, que funcionan a modo de palancas que transforman las contracciones musculares en movimientos organizados. En cambio, un esqueleto hidrostático, como el del calamar, no es intrínsecamente rígido; se trata, esencialmente, de un recipiente de tejido relleno de fluido, que es el que ejerce el trabajo. Puesto que el líquido es incompresible, su volumen no cambia cuando los músculos de la pared del cuerpo (el recipiente) se contraen. Si los músculos se contraen en equilibrio, el fluido se presuriza y el esqueleto se hace rígido; si un grupo muscular domina sobre los demás, el animal cambia de forma y se mueve.

En la mayoría de organismos hidrostáticos, el fluido operante es el agua o la sangre que llenan la cavidad cilíndrica del cuerpo, y que constituyen una gran parte de la masa del animal. Estos organismos son muy flexibles (piénsese en la lombriz de tierra), pero, puesto que el propio líquido no genera energía mecánica, no suelen acometer movimientos rápidos. Sin embargo, en los calamares, el líquido operante no es el agua de la cavidad paleal, que se expulsa en chorro, sino agua intra- e intercelular del tejido muscular de la pared del cuerpo. Mientras que el sistema hidrostático de una lombriz de tierra consta de una pared muscular que comprime una masa relativamente grande de fluido inerte, el del calamar lo constituye, en esencia, el propio músculo, lo que nos habla de una relación entre producción de energía y masa potencialmente muy alta. Desde el punto de vista estructural, el calamar está diseñado de manera única para explotar el potencial de este hidroesqueleto muscular en forma de máquina nadadora de gran velocidad.

Los calamares no son los únicos animales que nadan por propulsión a chorro. Sus parientes cercanos, los pulpos, también lo hacen. Si bien el mecanismo es básicamente el mismo, las diferencias son instructivas, y se reflejan en las pautas de comportamiento, distintas, de uno y otro grupo. Los pulpos no son nadadores activos; pasan la mayor parte del tiempo arrastrándose por el fondo del mar, dentro de anfractuosidades y debajo y por encima de las piedras.

El manto de un pulpo es una bolsa cilíndrica formada por tres conjuntos de músculos ortogonales (mutuamente perpendiculares) independientes: músculos longitudinales, que corren paralelos al eje de la bolsa sobre sus superficies interna y externa; anillos de músculo circular, que corren alrededor de la bolsa, y músculos radiales, que se extienden por la pared del manto, perpendiculares al eje. Cuando los tres grupos de músculos se contraen al unísono, el agua del tejido muscular se presuriza y se endurece el manto. Si un



1. CICLO DE HUIDA A REACCION del calamar *Loligo opalescens*, ilustrado en imágenes laterales y cortes transversales. El ciclo se inicia con la hiperinflación (*1*), en la que el diámetro externo del manto aumenta aproximadamente en un 10 por ciento, respecto del estado de relajación, y el volumen de la cavidad interna aumenta en un 22 por ciento. El agua fluye al interior de la cavidad a través de grandes aberturas de cada lado de la cabeza, pasando sobre la superficie del embudo, o sifón (*sección horizontal de la izquierda*), una estructura de tejido que surge de la cabeza y se dirige hacia atrás. Tras alcanzar la expansión su máximo, el manto se contrae hasta aproximadamente un 75 por ciento de su diámetro relajado (*2*). La presión en la cavidad aumenta mucho, lo que fuerza al embudo contra la pared del manto y sella las aberturas. Casi toda el agua (equivalente a cerca del 60 por ciento del volumen del manto en relajación) se expele a través del estrecho sifón en un potente chorro. Seguidamente el manto se vuelve a llenar hasta su nivel de relajación (*3*); una contracción ulterior podría dañar los órganos internos, que son blandos. El ciclo de huida a reacción dura alrededor de un segundo y puede repetirse de seis a 10 veces. Cuando el calamar nada a baja velocidad, su manto se contrae, sin hiperinflarse, hasta aproximadamente el 90 por ciento de su diámetro relajado. *L. opalescens* mide de 15 a 20 centímetros de longitud.

grupo se contrae más enérgicamente que los demás, el manto cambia de forma.

El chorro lo produce, en primer lugar, la contracción de los músculos circulares: reduce el diámetro del manto y expulsa el agua de la cavidad. Puesto que los músculos sólo efectúan trabajo mecánico cuando se contraen, debe existir un grupo de músculos antagonistas que expanda luego el manto y vuelva a llenarlo de agua. En los pulpos esta tarea corre a cargo de los músculos radiales, y el antagonismo es hidrostático. Cuando los músculos circulares se encogen, durante la fase de chorro, también se hacen más anchos, porque el volumen muscular debe permanecer constante. Simultáneamente, el pulpo tensa sus músculos longitudinales, con lo que impide que el manto se alargue; la pared se torna más gruesa y, con ello, se extienden los músculos radiales. Al final de la fase de chorro, los músculos radiales pueden contraerse, lo que adelgaza la pared del manto, aumenta el diámetro de la cavidad y permite que ésta se vuelva a llenar de agua. Ello extiende asimismo los músculos circulares y los prepara para el siguiente ciclo.

El mecanismo de chorro de los calamares es similar, pero con una diferencia decisiva: como han demostrado Stephen A. Wainwright y Diana Valiela, de la Universidad de Duke, en lugar de músculos longitudinales, en las superficies interna y externa hay capas de colágeno, las llamadas túnicas. El colágeno es una fibra proteica que se encuentra en casi todos los animales; en los vertebrados es el componente principal de tendones y ligamentos. Las fibras de las capas de colágeno del calamar se encuentran arrolladas en espiras, que se entrecruzan alrededor del manto ahusado. (La estructura se parece a la de un neumático radial de los que se hallan cinturados al sesgo.) Las túnicas son rígidas y mucho más fuertes que los músculos a los que sustituyen. Desempeñan dos importantes funciones.

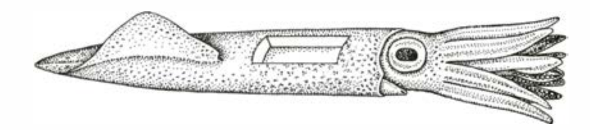
En primer lugar, al igual que los músculos longitudinales, las túnicas impiden que el manto se distienda cuando los músculos circulares o radiales se contraen. Sin embargo, mientras que el pulpo debe gastar energía metabólica para desarrollar tensión en los músculos longitudinales, el calamar no precisa hacerlo, porque las túnicas son rígidas en el sentido longitudinal. Además, la fortaleza de las túnicas permite que sean delgadas; ello deja una mayor porción del manto para músculos circulares, que son los que en realidad impulsan el chorro. La musculatura del manto del calamar está constituida por bandas alternantes de músculo circular y radial; el músculo circular ocupa alrededor del 90 por ciento del volumen total. Las túnicas interna y externa, juntas, suponen típicamente sólo el 1 por ciento del grosor de la pared, comparado con el 15 al 20 por ciento que ocupan los músculos longitudinales en el pulpo. Así pues, prácticamente toda la masa del manto del calamar se dedica a la propulsión.

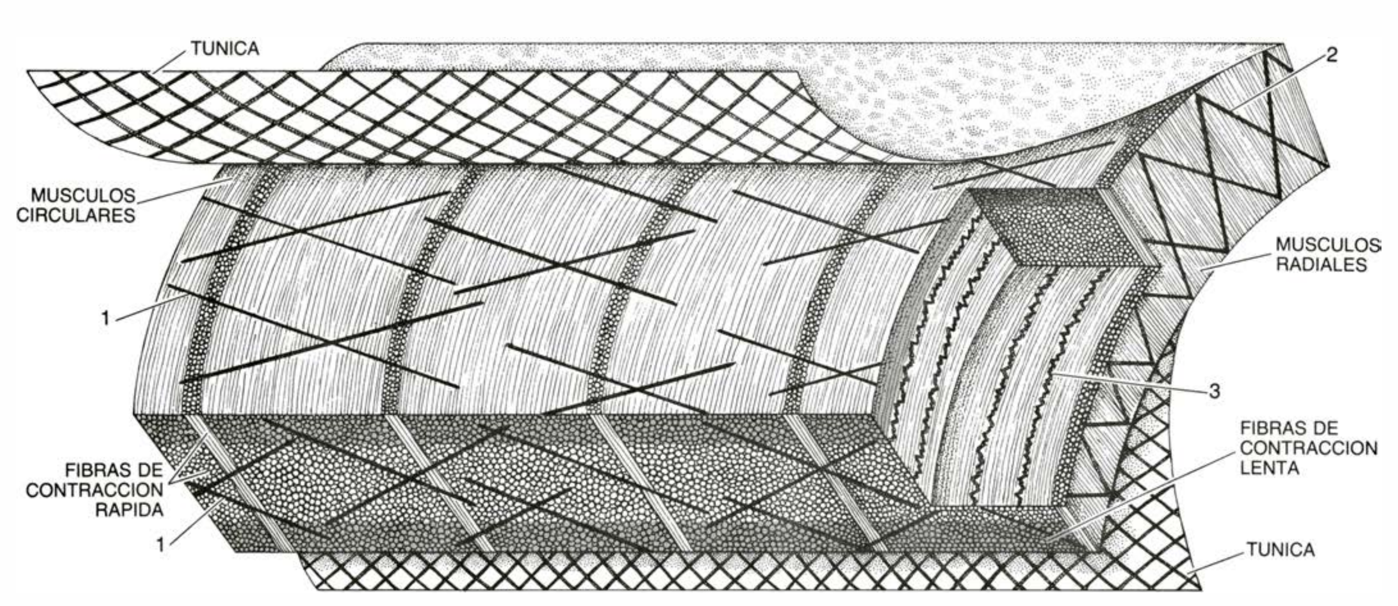
En segundo lugar, las túnicas proporcionan una sólida superficie de inserción a los músculos radiales. Las membranas de inserción sobre las superficies interna y externa del manto del pulpo, por su parte, son relativamente endebles. Las robustas túnicas de colágeno permiten que los músculos radiales del calamar se contraigan mucho más enérgicamente después de la emisión del chorro, con lo que la cavidad paleal se vuelve a llenar más deprisa. El doble papel de las túnicas transforma el manto del calamar en una estructura especializada para la propulsión a chorro y hace de los calamares mejores nadadores que los pulpos. Por otra parte, la rigidez de las capas de colágeno impide que los calamares se encorven fácilmente, con lo que los pulpos son mejores a la hora de escurrirse en las grietas del fondo marino.

El firme anclaje de los músculos radiales del calamar en las túnicas se demuestra esencial en la secuencia de impulsos de aceleración que caracterizan la emisión del chorro en la huida. Al inicio de un ciclo de huida a reacción, los músculos radiales se contraen poderosamente, y así la pared del manto se hace más delgada. Puesto que el volumen total de músculo debe permanecer constante y el manto no puede alargarse, su diámetro externo aumenta del orden del 5 al 10 por ciento sobre el estado relajado. Tal expansión, denominada hiperinflación, permite la entrada en la cavidad paleal de una cantidad máxima de agua, lo que ceba al animal para la emisión del chorro.

Durante la fase de reacción a chorro la contracción de los músculos circulares eleva la presión de la cavidad paleal hasta unos 25 kilopascal. (La presión sanguínea sistólica normal en el hombre es de unos 16 kilopascal.) El diámetro externo se reduce en un 30 por cien-

2. MANTO DEL PULPO. Consta de tres grupos musculares ortogonales, que ejercen presión sobre el fluido que trabaja: el agua del tejido muscular. La contracción de los músculos circulares que rodean el manto sacciforme encoge la bolsa y produce el chorro. Simultáneamente, la tensión de los músculos longitudinales evita que el manto se alargue; la pared se hace más gruesa y se extienden los radiales. La contracción de los músculos radiales adelgaza la pared y obliga a la bolsa a llenarse nuevamente de agua. El pulpo puede deformar su manto y deslizarse sobre las rocas e introducirse por entre las grietas, valiéndose del procedimiento de contraer más una de las capas de músculos longitudinales que la otra.





3. MANTO DEL CALAMAR. Posee músculos radiales y circulares como los de un pulpo, pero en el lugar de los músculos longitudinales aparecen rígidas túnicas de colágeno. Sin gastar energía muscular, las túnicas evitan que el manto se alargue cuando uno u otro de los dos grupos musculares se contrae. Proporcionan asimismo sólidas superficies de inserción para los músculos radiales. Estos músculos están constituidos por entero de fibras de contracción rápida, glucolíticas, lo que sugiere que se contraen únicamente durante la natación de huida, para potenciar la hiperinflación. Los músculos circulares están constituidos por una gruesa capa central de fibras de contracción rápida y dos capas finas de fibras de contracción lenta, aeróbicas, que inducen la natación lenta. Por los músculos corren tres grupos de fibras de colágeno. Las fibras de dos de esos sistemas (*1, 2*) se dilatan cuando los músculos circulares se contraen y engruesan la pared del manto durante la fase de emisión del chorro; la energía elástica que almacenan se libera cuando el manto vuelve a llenarse. Las fibras del tercer grupo (*3*) se dilatan cuando los músculos radiales se contraen durante la hiperinflación; facilitan la emisión del chorro.

to, la pared del manto se adelgaza incluso hasta la mitad y el diámetro interno cae aproximadamente en un 40 por ciento. Casi toda el agua se expele de la cavidad paleal. Luego comienza de inmediato el rellenado; durante este proceso la presión en la cavidad del manto se hace negativa y disminuye hasta alrededor de −1 kilopascal. El ciclo se repite, por lo general, de seis a 10 veces hasta que el animal ha escapado.

Las cantidades de agua que se mueven en el vaciado y rellenado del manto son las mismas, de modo que las diferencias de presión entre los dos estados indican que el calamar efectúa mucho más trabajo durante la fase de reacción a chorro. Ello lo hace forzando el agua hacia el exterior de la cavidad paleal a alta velocidad a través de un tubo infundibuliforme único (el sifón), mientras que el agua penetra lenta en la cavidad a través de dos grandes aberturas, a ambos lados de la cabeza. El sifón, que surge de la parte posterior de la cabeza y penetra en la cavidad, donde su extremo más ancho está fijo a la pared del manto, dirige el flujo unidireccional de agua. Válvulas de lengüeta sobre su superficie dorsal permiten que el agua fluya hacia el interior del manto durante el rellenado, pero durante la fase de chorro la presión positiva de la cavidad fuerza las lengüetas contra la superficie interna de la pared del manto, cerrando las válvulas y canalizando la salida del agua a través del sifón. El tubo de éste es flexible, y el calamar puede nadar hacia atrás, hacia delante y prácticamente en cualquier otra dirección mediante el simple procedimiento de dirigir el chorro de agua en la dirección opuesta.

El chorro es versátil y potente, pero no se muestra particularmente eficaz. Mientras que el movimiento ondulatorio u oscilante de un pez que nada acelera una masa de agua relativamente grande, un calamar no puede mover más agua que la que cabe en su cavidad paleal. Los peces que nadan por movimiento caudal alcanzan eficacias hidrodinámicas del orden del 85 por ciento, a velocidades óptimas. Sin embargo, para conseguir el mismo empuje que un pez del mismo tamaño, un calamar debe impartir mayor velocidad a una masa de fluido más pequeña. Cuanto más alta es la velocidad, mayor es la cantidad de turbulencia en el agua acelerada. Esta forma de fricción reduce la eficacia con la que los calamares convierten la potencia muscular en impulso hidrodinámico útil.

No se dispone de datos exactos sobre la eficacia hidrodinámica de la propulsión a chorro en el calamar, pero las mediciones del coste metabólico asociado a la emisión del chorro sí apuntan la envergadura de su ineficacia. Ronald K. O'Dor, de la Universidad de Dalhousie, Nueva Escocia, midió recientemente la tasa de consumo de oxígeno en calamares que nadaban sin cesar en un respirómetro y comparó los resultados con los obtenidos en salmones de tamaños similares. El coste metabólico de la natación lenta y continua, expresado como energía por unidad de peso corporal por unidad de distancia recorrida, era cuatro veces mayor en los calamares que en el salmón.

La excepcional capacidad respiratoria de los calamares ayuda a compensar el escaso rendimiento de la propulsión a chorro; el movimiento ondulatorio de sus aletas proporciona asimismo una segunda fuente de potencia, que quizá mejore algo la eficacia hidrodinámica total, en particular a bajas velocidades de natación. No obstante, es evidente que los calamares están en desventaja con respecto a los peces en la natación sostenida. O'Dor llega a la conclusión de que su capacidad de com-

petir con éxito debe atribuirse en gran parte a la energía de aceleración y a la maniobrabilidad que muestran durante la natación explosiva, o de huida.

La mayor parte del músculo del manto del calamar parece entrar en acción sólo durante esas explosiones de gran velocidad. En general, los animales tienen dos tipos de fibras musculares: fibras "de contracción rápida", que proporcionan energía a movimientos súbitos y rápidos, y fibras "de contracción lenta", que potencian movimientos más lentos y más sostenidos. Las fibras de contracción rápida pueden contraerse rápidamente porque poseen la enzima miosina-ATPasa, que permite la degradación del adenosín trifosfato (ATP) y la conversión resultante de energía química en potencia mecánica, todo ello a una tasa elevada. El ATP se obtiene principalmente por glucolisis, una ruta metabólica que se activa más fácilmente que la respiración. Las fibras de contracción rápida contienen pocas mitocondrias (los orgánulos de la respiración); en cambio, poseen gran cantidad de miofilamentos, los elementos contráctiles de las células musculares. En consecuencia, pueden desarrollar grandes tensiones. Sin embargo, su reducida capacidad aeróbica determina que se fatiguen rápidamente. Las fibras de contracción lenta poseen las características opuestas: su miosina-ATPasa tiene, por norma, una tasa catalítica menor, lo que las hace eficientes a velocidades de contracción más bajas; su metabolismo es aeróbico, de modo que son ricas en mitocondrias y resisten la fatiga; contienen menos miofilamentos, por lo que sus contracciones son menos poderosas.

T. P. Mommsen y sus colegas, en la Universidad de Columbia Británica, y Quentin Bone y su grupo, en la Asociación de Biología Marina en Plymouth, Inglaterra, han demostrado que esos dos tipos de fibras se hallan segregados en tres capas en los músculos circulares del manto del calamar. A partir de los datos revelados por microscopía electrónica y análisis enzimático, los investigadores identificaron dos capas relativamente finas de músculo de contracción lenta justo debajo de las túnicas interna y externa. Una capa central gruesa, que por lo general constituye más del 80 por ciento del volumen total del músculo circular, está compuesta de fibras de contracción rápida. Presumiblemente, esa capa central glucolítica se contraiga únicamente durante la natación explosiva o de huida, y las capas musculares de contracción lenta, aeróbicas, se utilicen en la natación continua a velocidades menores.

Es más, se observó que todas las fibras de las bandas de músculo radial eran del tipo de contracción rápida. Supuesto que tales fibras fueran activas sólo durante la emisión del chorro en la huida, este hallazgo bastante inesperado sugería que los músculos radiales no desempeñaban papel alguno en el rellenado del manto cuando el calamar nadaba lentamente. Durante la natación lenta el manto retorna solamente a su diámetro de reposo, sin hiperinflarse. Aun así, algo debe impulsar el proceso de rellenado. Estas consideraciones nos condujeron a los autores y a otros investigadores a estudiar lo que puede ser la característica más interesante del manto del calamar: su elasticidad.



4. FIBRAS INTERMUSCULARES DE COLÁGENO en una micrografía (obra de los autores) de la sección longitudinal de la pared del manto de un calamar. El corte va paralelo al plano frontal del dibujo de la figura 3: la banda vertical clara es un músculo radial y las regiones oscuras son músculos circulares que corren fuera del plano de la micrografía. Las rayas horizontales inclinadas son fibras de colágeno que pertenecen al primer grupo; discurren en espiral, en una dirección generalmente longitudinal, a través de la pared del manto y se fijan a las superficies interna y externa de las túnicas de colágeno.

Junto con nuestros colegas John D. Steeves y Anthony D. Harman hemos insertado electrodos en el músculo paleal de calamares cautivos y hemos registrado la actividad eléctrica que generan las señales nerviosas transmitidas al músculo durante la huida por propulsión a chorro. Este procedimiento, llamado electromiografía, nos permite determinar los momentos precisos en los que los músculos se contraen. Correlacionando las señales del electromiograma (EMG) con observaciones del diámetro del manto cabe inferir si los músculos activados son los radiales o los circulares.

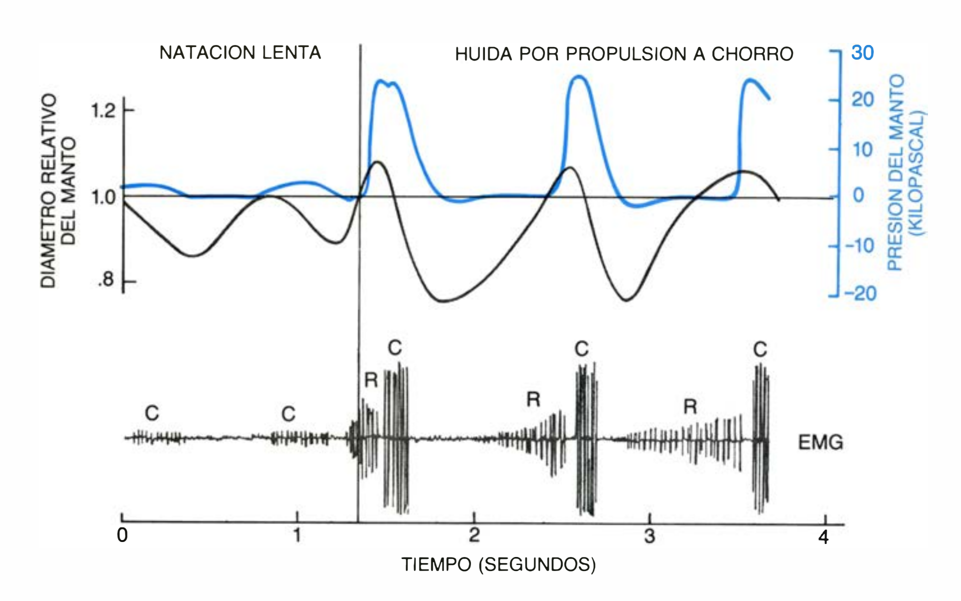
Se observan siempre picos en el EMG durante la hiperinflación y durante la fase de propulsión a chorro, lo que indica que esas partes del ciclo las provocan contracciones musculares. Sin embargo, inmediatamente después del chorro, a medida que el manto comienza a rellenarse, se detecta a menudo muy poca actividad eléctrica. Esta observación tiende a confirmar nuestra sospecha de que un mecanismo elástico, eléctricamente silencioso, ayuda a expandir el manto. Además, una comparación detallada de las señales del EMG con los niveles de presión de la cavidad del manto durante la emisión del chorro muestra que la presión comienza a aumentar unos 50 milisegundos antes de que se registre la primera actividad del músculo circular, y alcanza alrededor del 30 por ciento de su máximo antes de que los músculos empiecen a contraerse. Así pues, parece que

también contribuye un mecanismo elástico al chorro, al menos durante la natación de huida. El manto del calamar debe contener algún tipo de resorte que le permita rebotar después de la contracción de un grupo muscular.

Robert E. Shadwick y uno de nosotros (Gosline) han demostrado que, efectivamente, el manto posee resortes de tejido, en forma de fibras de colágeno entrelazadas a través del músculo. Tales fibras intermusculares, identificadas por primera vez por investigadores de Duke y de la Asociación de Biología Marina, se disponen en tres grupos. Las fibras del primer grupo se arrollan en espiral a través de la pared del manto en una dirección básicamente longitudinal y se fijan a las túnicas interna y externa. El segundo grupo de fibras termina también en las túnicas, pero se halla limitado a las bandas de músculo radial, de modo que se orientan radialmente. El tercer grupo se dispone paralelamente a los músculos circulares y no está fijado a las túnicas.

Si bien las capas de colágeno que constituyen las túnicas son gruesas y no se extienden durante el ciclo de propulsión a chorro, las fibras intermusculares dispersas son muy finas y se estiran de forma reversible, del orden de un 10 por ciento. En este proceso pueden almacenar y liberar grandes cantidades de energía elástica. Cuando los músculos circulares se contraen durante la fase de chorro, y con ello engruesan la pared del manto, extienden los dos primeros grupos de fibras. Comprimiendo el tejido del manto, remedando la acción de los músculos circulares, hemos medido las propiedades mecánicas de esos resortes de tejido y hemos constatado que su almacenamiento de energía es eficaz: liberan del 75 al 80 por ciento de la misma cuando se relajan. La energía de los resortes queda entonces disponible para ayudar a la expansión del manto durante el rellenado. De forma similar, el tercer grupo de fibras de colágeno se extiende cuando los músculos radiales se contraen durante la hiperinflación. La energía almacenada se libera cuando los músculos radiales se relajan, al inicio de la fase de emisión del chorro. Esta secuencia de acontecimientos explica sin duda por qué la presión de la cavidad paleal aumenta rápidamente incluso antes de la activación de los músculos circulares.

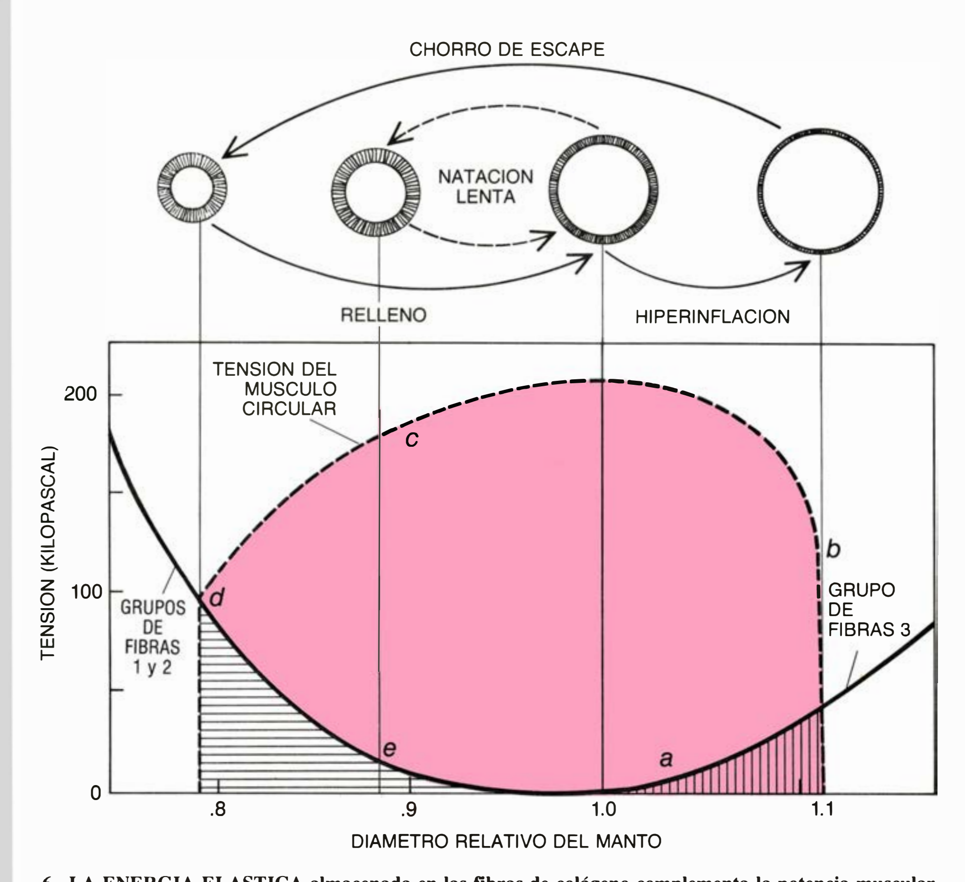
Nuestro análisis del papel de los resortes hísticos plantea de inmediato una respuesta embarazosa: puesto que la energía que almacenan procede directamente de la contracción de los músculos del manto, ¿no se estará desviando dicha energía de la generación de un empuje hidrodinámico útil? Para responder a ello habrá que considerar con más detalle el ciclo de la emisión del chorro y las propiedades mecánicas de las fibras de colágeno. Resulta que los grupos de fibras están construidos de tal modo que almacenan energía únicamente en momentos del ciclo de propulsión a chorro en los que los músculos no pueden aplicar toda su potencia a la realización de trabajo hidrodinámico. Las fibras liberan energía cuando ésta puede efectuar una contribución útil.



5. REGISTROS ELECTROMIOGRAFICOS (EMG) de los músculos del manto de calamares cautivos, que muestran picos correspondientes a contracciones de los músculos radiales (*R*) durante la hiperinflación, momento en el que el diámetro del manto (*curva negra*) aumenta más allá del nivel de relajación; los grandes picos de la subsiguiente fase de emisión del chorro corresponden a contracciones de los músculos circulares (*C*). Prácticamente no hay actividad muscular aparente inmediatamente después del primer chorro de escape, de lo que cabe deducir que algún mecanismo de retroceso elástico, eléctricamente silencioso, insta el relleno del manto. Sin embargo, es probable que los calamares que nadan libremente muestren una pauta de actividad muscular más parecida a la del segundo ciclo de emisión del chorro, en el que las contracciones de los músculos circulares aceleran el relleno. En la natación lenta, los músculos radiales no entran en actividad; el manto no se hiperinfla y los niveles de presión de la cavidad paleal (*curva de color*) son mucho más bajos que los característicos de la propulsión a chorro de huida.

A partir de la medición del diámetro del manto y de la presión de la cavidad paleal, hemos calculado la potencia hidrodinámica del chorro, que es igual al volumen del agua expelida por la presión, en cada estadio del ciclo. Durante la primera mitad de la fase de emisión del chorro, la presión es alta y el diámetro del manto disminuye rápidamente. La mayor parte del empuje hidrodinámico desarrollado por los músculos circulares se genera en este período. Sin embargo, en la segunda mitad del ciclo la potencia hidrodinámica decae rápidamente a cero, pese a que el manto sigue contrayéndose. La caída es consecuencia de la forma cilíndrica del manto: el volumen de un cilindro es proporcional al cuadrado de su radio, de modo que sucesivos incrementos de la contracción expulsan volúmenes de agua cada vez más pequeños. La consiguiente reducción de la velocidad del flujo de salida hace también que se reduzca la presión en el manto. De ahí que, hacia el final del chorro, los músculos circulares ya no apliquen toda su potencia a la generación de empuje. Cabría esperar que entonces se relajaran.

Sin embargo, no se relajan; precisamente en ese período se almacena energía en los dos primeros grupos de resortes hísticos. Nuestras pruebas de compresión demostraron que el manto se deformaba fácilmente al inicio de la fase de emisión del chorro, cuando la potencia hidrodinámica era elevada. En ese estadio las fibras de colágeno absorben muy poca potencia muscular. Sin embargo, hacia el final de un chorro de huida, cuando el nivel de compresión se acerca al 20 por ciento, el tejido del manto adquire la rigidez del caucho sólido. La rigidez no proviene del músculo, relativamente fluido, sino de las fibras de colágeno que, aunque sólo constituyen el 0,5 por ciento del volumen del manto, son unas 1000 veces más duras que el músculo. Para comprimir el tejido del manto en un 20 por ciento los músculos circulares deben mantener su nivel de tensión aproximadamente a la mitad de su valor máximo, a medida que el chorro disminuye gradualmente y la potencia hidrodinámica cae a cero. Esta potencia muscular adicional se almacena en los dos primeros grupos de fibras y



6. LA ENERGIA ELASTICA almacenada en las fibras de colágeno complementa la potencia muscular en la emisión del chorro. Las curvas continuas muestran los niveles de tensión que se precisan para dilatar los tres grupos de fibras por las cantidades asociadas a diversos diámetros del manto. Durante la hiperinflación (*a*) la contracción de los músculos radiales expande el diámetro del manto del orden de un 10 por ciento y dilata las fibras que corren paralelas a los músculos circulares. En las fibras se almacena energía elástica (*rayado vertical*), que se libera cuando, al principio de la fase de chorro, la tensión de los músculos circulares aumenta enormemente (*b*). Al principio casi toda la energía que generan los músculos circulares se convierte en trabajo hidrodinámico (*área de color*); a medida que el manto se contrae a menos de su diámetro de reposo (*c*), una porción creciente de la potencia va a la dilatación de los dos grupos de fibras que atraviesan la pared. La contracción se detiene (*d*) cuando la tensión muscular no es suficiente para dilatar las fibras; la energía que se almacena en ellas (*rayado horizontal*) ayuda al rellenado (*e*).

queda disponible para producir los primeros estadios del rellenado de la cavidad paleal, momento en el que las necesidades de energía hidrodinámica son considerables.

Aunque no hemos estudiado el tejido del manto en condiciones de expansión, es probable que el tercer grupo de fibras almacene energía a partir de los músculos radiales de manera similar durante la hiperinflación. El trabajo hidrodinámico que se precisa para la hiperinflación es básicamente nulo, puesto que el agua penetra en la cavidad paleal a través de aberturas grandes, a baja velocidad y presión despreciable. Sin embargo, los registros del EMG indican claramente que los músculos radiales son muy activos en este estadio. Sospechamos que casi toda su potencia se almacena en las fibras de colágeno. La energía elástica se libera luego para aumentar la potencia de salida en el inicio de la propulsión a chorro, de nuevo cuando las necesidades energéticas son elevadas. En conjunto, los tres grupos de fibras permiten que el manto del calamar genere mayores empujes de los que sería capaz si fuera puro músculo, y lo hacen sin aumentar significativamente su masa total.

Los calamares deben su potencia como nadadores a un esqueleto en el que el peso muerto fluido se ha sustituido por músculo, y en el que el músculo se halla debidamente endurecido por colágeno. A su vez, sus extraordinarios logros natatorios explican su capacidad para competir con los peces. ¿Hasta qué punto tienen éxito? Recuérdese su notable predominio en el océano, del que constituyen una fracción importante de la biomasa total. No se dispone de datos fidedignos sobre la abundancia de calamares, pero se ha estimado que los cachalotes comen alrededor de 100 millones de toneladas de ellos al año, mientras que la captura total de peces por pescadores comerciales, en todo el mundo, alcanza sólo los 70 millones de toneladas.

La ballesta

Esta formidable arma, inventada hace 2400 años, generalizó su uso en el siglo XI. *Durante 500 años, hasta el advenimiento de armas de fuego, fue preponderante en situaciones defensivas*

Vernard Foley, George Palmer y Werner Soedel

Desde el siglo XI hasta el advenimiento de armas de fuego eficaces, unos 500 años más tarde, la ballesta constituyó una formidable arma de guerra. Servía principalmente para la defensa de lugares fortificados o protegidos, como castillos y barcos. También contribuyó en gran manera al conocimiento de los materiales (debido a las fuerzas que la ballesta tenía que resistir) y de la aerodinámica (a causa de las peculiares características de vuelo de la saeta). La aerodinámica de la saeta y los principios de su utilización inspiraron muchas de las incursiones que Leonardo da Vinci hiciera en el campo de la física y la ingeniería.

Los armeros y flecheros que diseñaron la ballesta y otras armas parecidas no sabían matemáticas y carecían de conocimientos formales de la física que subyace a la ingeniería. Con todo, las pruebas que hemos llevado a cabo en la Universidad de Purdue muestran que estos artesanos se las ingeniaron para lograr un alto grado de refinamiento aerodinámico y un buen dominio de los principios mecánicos.

La ballesta, como máquina, no es compleja. Un arco, generalmente demasiado vigoroso para ser tensado sin ayuda mecánica, se monta transversalmente en la parte delantera de un palo de madera o metal que recibe el nombre de tablero. Se instala un medio para sujetar la cuerda en su máxima tensión, así como para soltarla. La flecha corta (la saeta) avanza por una canal abierta en la parte superior del tablero o bien por unas guías que dan soporte a la saeta en cada extremo. Si el arco es lo suficientemente poderoso, para tensarlo se construirá un dispositivo en el tablero o aparte.

El diseño ofrecía dos ventajas sobre el arco. En primer lugar, la ballesta conseguía un mayor alcance, por lo que los ballesteros podían disparar impunemente a los arqueros que estaban aún a demasiada distancia para contraatacar. En segundo lugar, el tablero y los dispositivos para montar y soltar la cuerda mecanizaron parcialmente el ciclo del disparo, aligerando el esfuerzo y la habilidad necesarios para utilizar el arma. Los garfios que sujetan y liberan la cuerda y la saeta suponen uno de los primeros intentos de mecanizar algunas de las funciones de la mano humana.

Una gran desventaja de la ballesta fue su ritmo lento de disparo, comparado con el del arco. En consecuencia, el uso militar de las ballestas quedó limitado principalmente a situaciones en las que se podía estar a cubierto a fin de poderlas cargar de nuevo. Esta es la causa de que fueran especialmente populares entre las guarniciones de castillos, así como en asedios y barcos.

La ballesta fue inventada mucho antes de que su uso se generalizara. Dos países, Grecia y China, reclaman para sí la autoría. Hacia el 400 a. C. los griegos idearon la catapulta, máquina que servía para arrojar flechas y piedras. La idea nació de los esfuerzos por aumentar la potencia de los arcos. La catapulta, parecida a la ballesta, acabó por adquirir unas dimensiones considerables, pero algunas de las primitivas parece que tenían el tamaño de una ballesta.

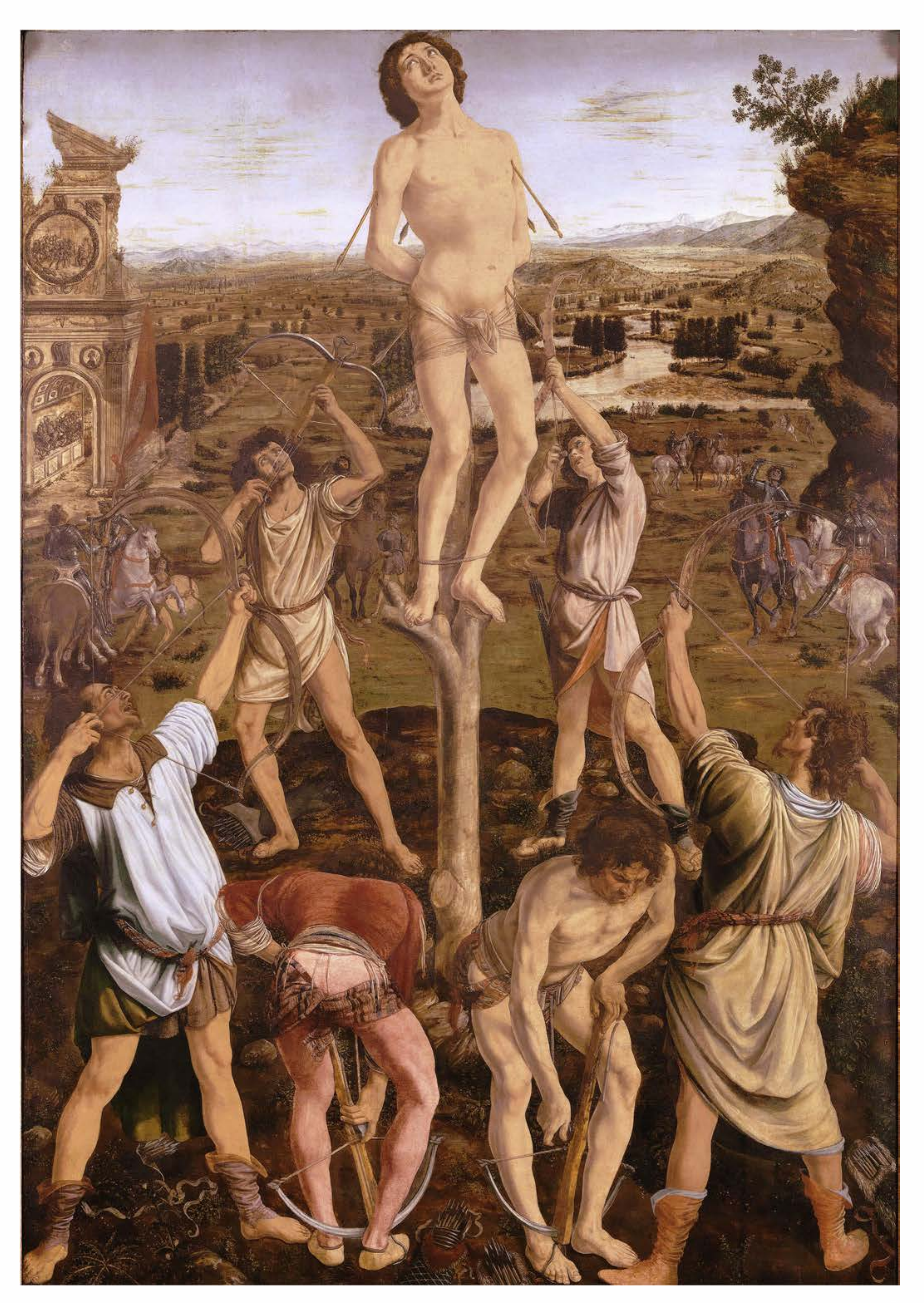
La reivindicación de China se apoya arqueológicamente en mecanismos de disparo, hechos en bronce, que datan aproximadamente del 200 a. C. Aunque el precedente griego es anterior a esta fecha, varios relatos escritos en chino sitúan el uso de la ballesta en batalla hacia el 341 a. C. Otras narraciones, cuya veracidad es difícil de constatar, retrotraen el uso del arma un siglo por lo menos.

Según las notas arqueológicas, parece que el uso de la ballesta continuó ininterrumpidamente en Europa desde los tiempos clásicos hasta su período de mayor popularidad: del siglo XI al XVI. Dos factores parecen haber limitado su interés antes del siglo XI. Un factor fue el hecho de que costaba más armar a las tropas con ballestas que con arcos; el otro, la relativa escasez de castillos, ya que éstos cobran importancia histórica sólo durante la época normanda.

Con el apogeo del castillo, la ballesta se convirtió en parte integrante de una revolución social violenta y cerradamente elitista. Las fortificaciones en los tiempos pre-normandos eran, a menudo, sencillas, diseñadas para un uso esporádico y sólo pretendían proteger a toda la población de un área determinada. Por este motivo, dentro de las murallas había una gran potencia de fuego cuando una banda merodeadora obligaba a los habitantes a buscar refugio. Los normandos impusieron su control por medio de una pequeña minoría militar, bien pertrechada, que dominaba a la población campesina y ciudadana mucho más numerosa. Sus castillos pretendían defender a una minoría de la mayoría, así como proteger a sus señores de los miembros armados y rapiñadores de su propia casta. El alcance superior de la ballesta les ayudó a dar seguridad a estos refugios.

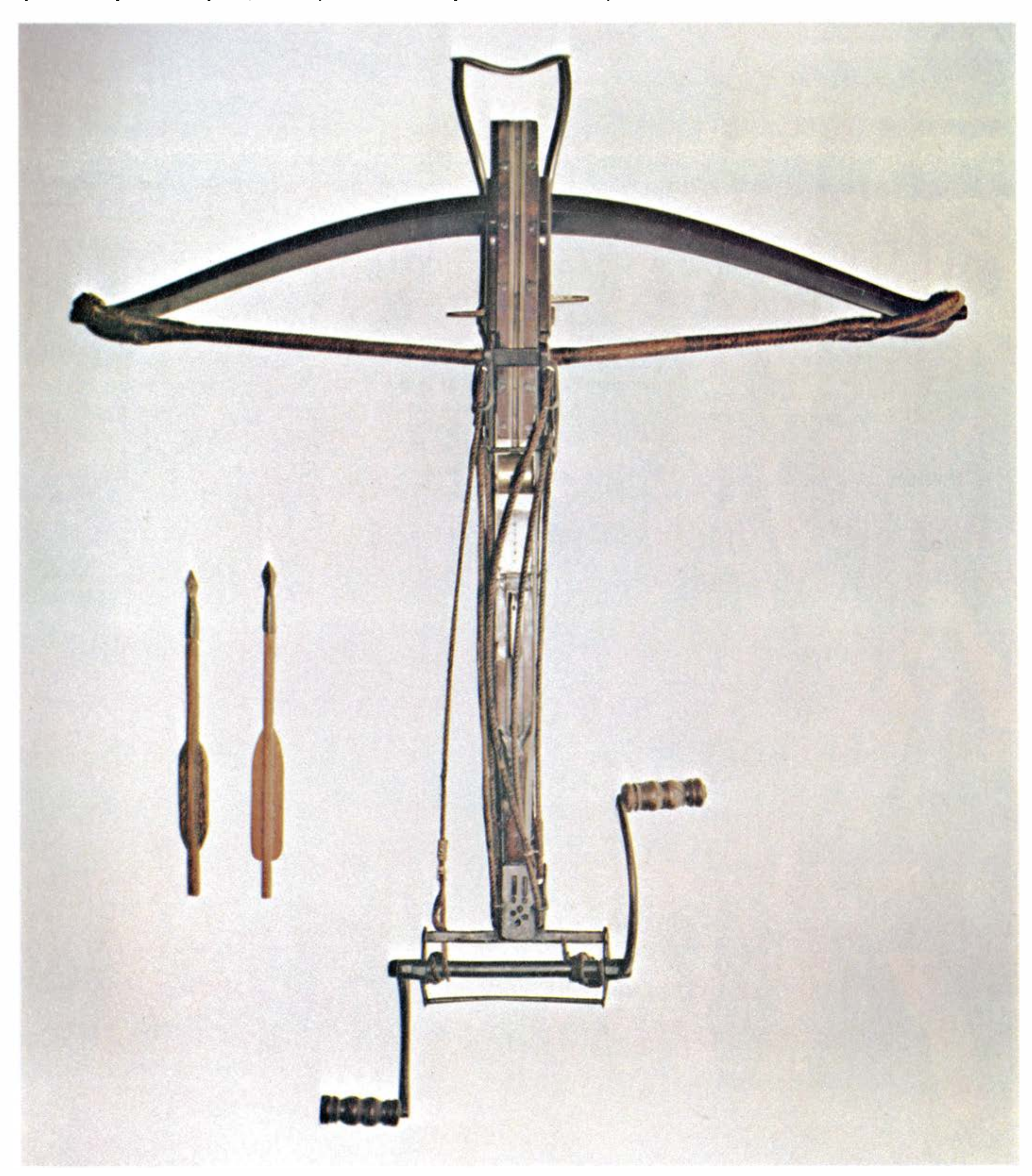
Durante los siglos que siguieron a la aparición de la ballesta como arma defensiva, se intensificaron los esfuerzos para conseguir aumentar su potencia. Una de estas mejoras pudo haberse tomado de los árabes. Los arcos árabes eran de un tipo llamado compuesto. Su estructura es digna de tal nombre, ya que son antecesores importantes de los

1. TRES BALLESTAS aparecen en esta pintura, "*El martirio de San Sebastián*", del artista italiano del siglo XV Antonio Pollaiulo. Un arquero está apuntando con una ballesta al mártir y dos hombres más están montando las suyas con ayuda de estribos, los cuales eran necesarios debido a la fuerte tracción del arco. La pintura se encuentra en la National Gallery de Londres, con cuyo permiso la reproducimos aquí.



materiales compuestos de hoy en día. Un arco compuesto ofrece claras ventajas sobre otro fabricado de un solo bloque de madera, puesto que la potencia de este último queda limitada por la fuerza propia del material. Mientras se tensa el arco, el material de la parte externa de su brazo (llamada dorso, porque da la espalda al arquero) está bajo tensión. La parte interna (seno) se halla bajo compresión. Si el arco es hipertensado, empiezan a desprenderse del dorso astillas de madera, llamadas tradicionalmente deslizantes, y en la parte interna (seno) aparecen pliegues llamados grecas o cristales. Por regla general, el brazo del arco queda entonces torcido permanentemente y si se le somete a una mayor tensión puede provocarse su rotura.

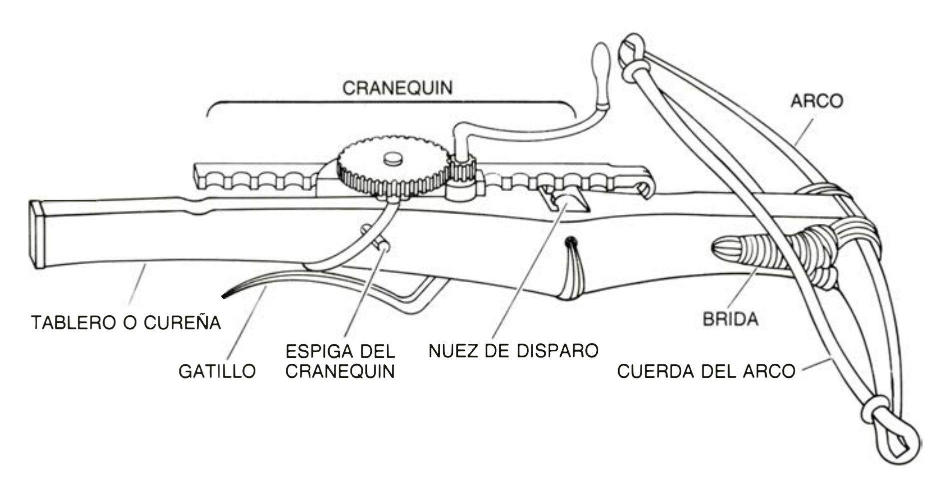
El material que, en tensión, es más fuerte que la madera se sitúa en un arco compuesto como capa reforzante sobre el dorso del arco, restando así algo de tensión a la madera y reduciendo, por consiguiente, la formación de astillas. El material más utilizado fue el tendón



2. BALLESTA MILITAR FRANCESA del siglo XIV y dos de sus saetas o flechas. Exhibidas en el Museo de la Academia Militar de West Point, N. Y. El arco, demasiado vigoroso para tensarlo a mano, lleva un molinete ajustado a la parte posterior del tablero o cureña que sirve para dicha función. El tablero mide en torno a 1 metro de largo; el arco tiene una anchura de algo más de un metro. La longitud de las saetas es de unos 38 centímetros.

animal, particularmente el *ligamentum nuchae*, que es el haz grande y elástico que recorre la columna vertebral y pasa por los hombros de la mayoría de los mamíferos. En pruebas realizadas con este material hemos descubierto que, cuando éste se ha preparado convenientemente, presenta una resistencia a la tracción de unos 20 kilogramos por milímetro cuadrado, lo que equivale a unas cuatro veces el rango de fatiga verosímil de las maderas más apropiadas.

Un material más resistente a la compresión que la mayoría de las maderas podía fijarse en la parte del seno del arco. Los turcos usaban cuerno de búfalo, que tiene una resistencia máxima a la compresión de unos 13 kilogramos por milímetro cuadrado. (La madera puede ser casi cuatro veces más débil bajo compresión de lo que es en tensión.) El nivel de refinamiento empírico que alcanzaron los constructores de arcos compuestos puede verse también en las colas que empleaban. La cola favorita se hacía con la piel del paladar del esturión del Volga. Este grado de refinamiento da testimonio de una vasta tradición experimental y selectiva.



3. ENTRE LOS COMPONENTES DE UNA BALLESTA se cuenta el arco curvado propiamente dicho, la cuerda, la nuez de disparo (que aguanta la cuerda) y el gatillo. Al tirar del gatillo caía la nuez, liberando la cuerda y disparando la saeta. La espiga del cranequín ponía en posición a éste, el cual tiraba de la cuerda del arco. El cranequín (*centro de la figura*) es un ejemplo primitivo de engranaje recargado.

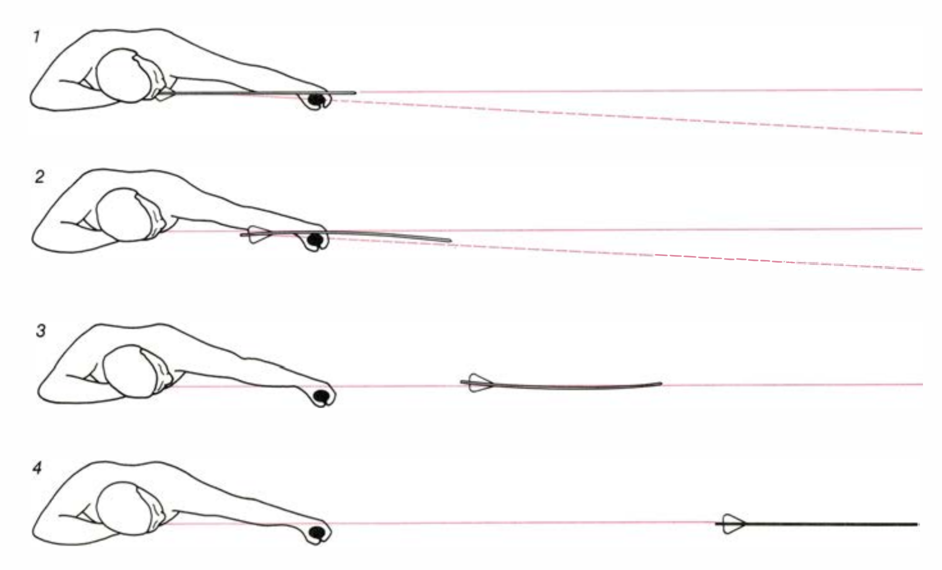
Las ballestas compuestas siguieron en uso durante la baja Edad Media hasta bien entrado el Renacimiento. Eran más ligeras de peso que las ballestas de acero que empezaron a construirse hacia el 1400 y tenían mayor alcance de tiro para una tracción dada, así como menos probabilidades de fallar. Dichos arcos eran bastante comunes en la época de Leonardo. Sus papeles indican que reflexionó sobre la construcción de arcos y que a partir de ellos llegó a principios fundamentales sobre cómo reaccionan los materiales sometidos a presión.

El arco de acero medieval supuso el cenit de la construcción de la ballesta. Su rendimiento no tuvo igual hasta la aparición de la fibra de vidrio y de otros compuestos modernos, después de la segunda guerra mundial. Los arcos de acero podían fabricarse con niveles de potencia que ningún otro material orgánico de la época podía igualar. El deportista victoriano Ralph Payne-Gallwey, que escribió un tratado clásico sobre la ballesta, puso a prueba un enorme arco de guerra cuya tracción era de 500 kilogramos y arrojó una saeta de 85 gramos a una distancia de 420 metros. El historiador de la ballesta Egon Harmuth opina que existían arcos cuya tracción era dos veces mayor. Los arqueros de arco largo de la época se veían limitados, por lo general, a arcos cuya tracción era inferior a 45 kilogramos. Incluso con flechas ligeras especiales parece ser que lograban un alcance de menos de 275 metros.

A medida que los arcos de acero conseguían nuevos niveles de fuerza, sus rendimientos disminuían. El aumento de la masa del brazo del arco limitaba la capacidad de aceleración del mismo. Era difícil producir acero en lingotes lo bastante grandes como para construir un arco entero, y por ello los brazos eran, normalmente, el resultado de soldar muchas piezas menores: cada soldadura implicaba una mayor posibilidad de fracaso y también representaba una cierta amenaza para el arquero.

El tener arcos más potentes creó la necesidad de mecanismos de disparo más poderosos. Hasta este momento los sistemas de disparo europeos, que estaban formados generalmente por una nuez giratoria y un gatillo de una sola palanca, eran, con mucho, inferiores a los mecanismos chinos, los cuales poseían una palanca intermedia que permitía al arquero disparar un arco pesado dando un tirón breve, seco y ligero al gatillo. Poco después del 1500 empezaron a aparecer en competiciones de tiro alemanas gatillos de palanca múltiple perfeccionados. Manuscritos fechados unos diez años antes muestran que Leonardo había llegado ya a este diseño y que había calculado sus ventajas mecánicas.

La saeta de la ballesta también mejo-



4. LA PARADOJA DEL ARQUERO explica, en parte, por qué se fabricaban tan cortas las flechas de ballesta. Tal paradoja se representa en la ilustración con un arquero que dispara una flecha de un arco común. Mientras apunta (*1*), la flecha pasa junto a uno de los bordes del arco. Su línea de mira coincide con la flecha. Cuando dispara (*2*), sin embargo, la fuerza de la cuerda empuja la cola de la flecha hacia el centro del arco. Si la flecha ha de mantenerse en la línea de mira, debe doblarse en vuelo (*3*). Durante los pocos primeros metros de vuelo vibra, para terminar por estabilizarse en la línea de vuelo (*4*). La necesidad de flexibilidad limita la cantidad de energía que puede ponerse en la flecha. A causa de la gran cantidad de energía generada por la ballesta, ésta requería flechas más cortas y rígidas; por consiguiente, no se doblaban. El acortar las flechas les proporcionaba también mejor aerodinámica en vuelo.

ró considerablemente con el paso de los años. La evolución se entiende mejor observando primero las fuerzas que se ejercen sobre la flecha de un arco. Para que esté cómodo el arquero que dispara un arco tradicional, la flecha debe llegar aproximadamente desde el centro de su pecho hasta el extremo de su brazo extendido. El arquero apunta la flecha mirando a lo largo del astil, cuyos extremos están limitados por sus manos. Estos dos puntos determinan la dirección que la flecha debería tomar al ser disparada.

Las fuerzas que actúan sobre la flecha al ser disparada, sin embargo, no coinciden demasiado con esta línea de mira. Una vez se suelte la cuerda, ésta empujará el extremo de la flecha más hacia el centro del arco que hacia el lado. Por tanto, si la flecha no se desvía de su línea de tiro, se torcerá ligeramente mientras se lanza.

La flexibilidad necesaria de la flecha del arco tradicional pone límites a la cantidad de energía que se le puede dar a la misma durante la aceleración. Por ejemplo, hemos comprobado que una flecha diseñada para un arco de unos 9 kilogramos de tracción puede desviarse de su trayectoria lo suficiente como para que el astil se rompa cuando sale disparada de una ballesta de unos 38,5 kilogramos de tracción.

Por eso en la antigüedad las flechas tenían que volverse a diseñar para su uso en ballestas y catapultas. Debido a que la superficie del tablero hacía coincidir mejor el movimiento de la cuerda con la trayectoria de vuelo inicial y a que sus guías sustituyeron las manos del arquero, las saetas se pudieron hacer más cortas y rígidas. Esto, a su vez, facilitó su almacenamiento y transporte.

Conservamos dos importantes tipos de flecha, prototipos de los distintos diseños que se llevaron a cabo. Uno de ellos viene a medir la mitad de longitud de la flecha de arco tradicional. Se ensancha bruscamente en su parte posterior y tiene barbas que, en sí, son demasiado pequeñas para estabilizar bien la flecha. Su base está diseñada para que la sujete un garfio disparador.

El otro tipo principal de flecha carece de barbas y plumas. Su punta metálica abarca aproximadamente un tercio de la longitud total, y el astil de madera se ha reducido a la longitud mínima necesaria para guiar la punta hacia adelante a través del aire. La parte posterior también se ha ensanchado. La longitud total no llega a los 150 milímetros.

Estas saetas indican una experiencia aerodinámica considerable por parte de los innovadores romanos, que las diseñaron. Hoy en día es bien sabido que las barbas que evitan que la flecha gire en vuelo son las que oponen la mayor resistencia al avance de una flecha. Reducir su tamaño permitiría a la flecha un mayor alcance, suponiendo que ésta no empezara a desviarse de su trayectoria, lo que aumentaría la resistencia en gran manera. Una solución es afilar el astil de forma que éste sea más estrecho en su parte anterior que en la posterior. Si un astil afilado empieza a virar, el total de la presión del aire será mayor en el segmento ensanchado posterior que en su menor sección frontal; por eso recuperará la alineación correcta.

En otras palabras: puede considerarse que el astil tiene un centro de fuerzas (el punto en que se equilibran todas las fuerzas aerodinámicas que actúan en el astil) situado detrás del centro de gravedad. En una flecha cilíndrica sin barbas este punto se encontrará cerca de la mitad del astil. En una saeta afilada el centro de fuerzas retrocede hacia la parte trasera gracias al ensanchamiento que allí existe. Dado que el centro de fuerzas es la popa del centro de gravedad, dicha flecha es más estable que un astil cilíndrico y experimenta menos resistencia que una con barbas. Ensanchar el astil en su parte posterior también ayuda a mantener la corriente de aire presionada suavemente contra la superficie. En la terminología de la aerodinámica moderna la capa límite tiene menor posibilidad de rotura. Acortar el astil de la flecha también es útil, puesto que la corriente de aire paralela a una superficie cilíndrica suele volverse más turbulenta a medida que aumenta la longitud de dicha superficie. El resultado es que la turbulencia que disminuye la energía se mantiene al mínimo a lo largo de la superficie del astil.

Otro factor que explica la superior eficacia de una saeta afilada parece residir en el diseño de su cola. La cola se empulga para que la saeta encaje entre los garfios del gatillo de una catapulta. Al igual que el afilado, el ajustamiento ayuda a suavizar la corriente de aire que sobrepasa la popa del proyectil, reduciendo la formación de una estela turbulenta que disipa energía.

a

b

c

5. MECANISMOS DE DISPARO de las ballestas. Los había de distintas clases. Un diseño chino de hace unos 2000 años (*a*) tenía un garfio para la cuerda que giraba sobre la misma clavija que el gatillo. Una palanca curvada intermedia conectaba ambas partes y hacía posible una presión corta y ligera en el gatillo. A la derecha vemos el movimiento de la cuerda cuando se aprieta el gatillo. La tecnología de disparo occidental apareció por primera vez en las gastrafetas (*b*), un mecanismo de la catapulta. Aquí el garfio se levanta, en vez de bajar, para liberar la cuerda. El disparador tradicional de la de Europa medieval (*c*) empleaba una pieza cilíndrica llamada nuez; era sujetada contra la fuerza del arco por un simple gatillo de palanca, la llave, que se engranaba en una muesca en el lado inferior de la nuez. La presión del arquero en el gatillo largo solía desviar el disparo. Sistemas de palancas intermedias se empezaron a usar gradualmente para hacer la presión más corta y ligera. (Dibujos de Andrew Christie).

a

FLECHA DE ARCO LARGO

b

SAETA AFILADA

c

SAETA DE BALLESTA

d

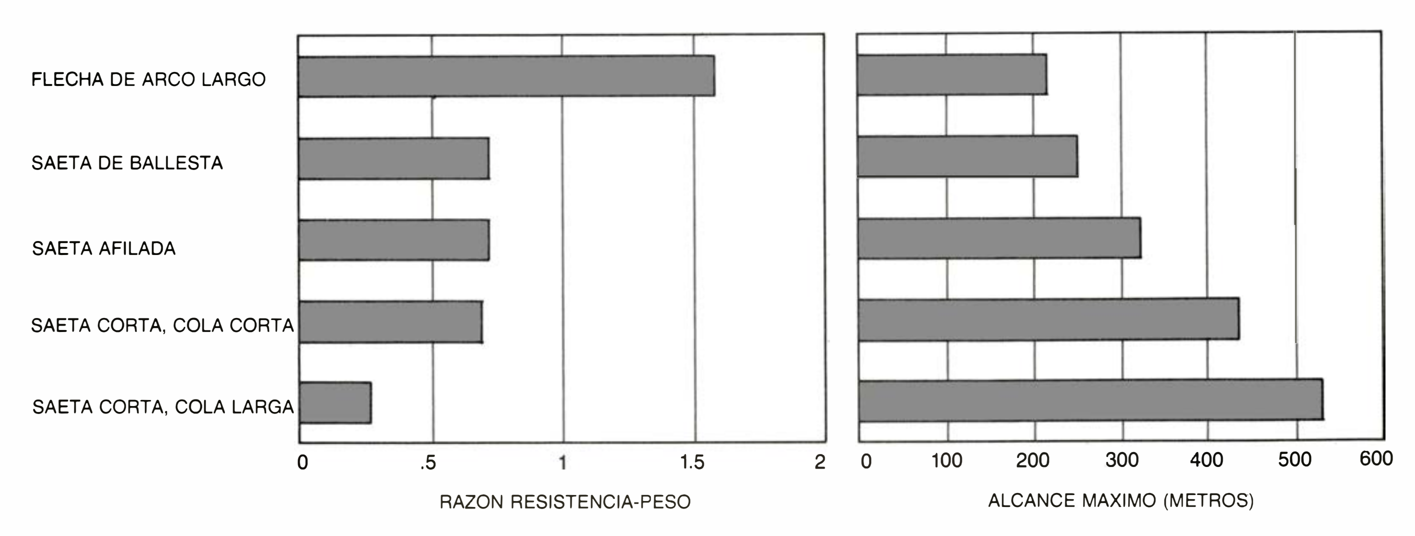
SAETA CORTA, COLA LARGA

SAETA CORTA, COLA CORTA

6. ENTRE LOS PROYECTILES para arcos distinguimos una flecha para arco largo de guerra, variante del arco manual (*a*); una saeta romana afilada lanzada por una catapulta parecida a una ballesta (*b*); una saeta típica medieval (*c*) y dos variantes de la saeta de otra catapulta romana hecha para una máquina de menor tamaño (*d*). Todas las imágenes superiores están de perfil; debajo de cada una se ven las de los extremos de la parte del proyectil.

No hay base para dar por sentado que los técnicos de la época tuvieron conocimientos sobre la presión o nociones sobre la corriente de aire y la resistencia. Estas ideas empezaron a surgir sólo con Leonardo. Sin duda, las saetas primitivas se diseñaron tras pruebas de ensayo y error, junto con una buena dosis de capacidad lógica. Probablemente los factores orientativos fueron el alcance máximo y la fuerza del impacto.

No obstante, los artesanos de la época lograron mejoras sustanciales en el diseño de proyectiles. Los experimentos en el túnel aerodinámico que hemos realizado en el laboratorio de ciencias aeroespaciales de la Universidad de Purdue justifican esta conclusión. Pusimos a prueba una flecha de arco de guerra típica medieval, un cuadrillo (una saeta de ballesta) medieval y los dos diseños conocidos para saetas de catapulta primitiva. Nuestros resultados deben ser interpretados con cierta reserva, puesto que las medidas de estos proyectiles, particularmente el más pequeño, se acercaban a los límites de sensibilidad del aparato de medición. Dentro mismo del campo reduci-



7. LAS PRUEBAS DE TUNEL AERODINAMICO de los cinco tipos de proyectil que aparecen en la figura 6 fueron realizadas en el laboratorio de ciencias aeroespaciales de la Universidad de Purdue. Los resultados están representados aquí. Los cálculos fueron computados por Wade H. Hickman para una velocidad inicial de 80 metros por segundo, demasiado elevada seguramente para el arco largo, si bien sirve de velocidad común comparativa.

do de nuestro análisis, surgieron algunas conclusiones provisionales interesantes. En primer lugar, la saeta más pequeña, que parece bastante completa a no ser por algún deterioro en la cola, permaneció probablemente estable en todos los ángulos de vuelo que cabía esperar, razonablemente, al utilizarla.

En segundo lugar, nuestro estudio comparativo de la razón resistencia-peso en los cuatro proyectiles revela que la flecha de arco es sustancialmente inferior a los otros. El peso puede considerarse como una medida de la capacidad del proyectil para almacenar energía. Si todos los proyectiles se lanzaran a la misma velocidad, su peso determinaría su energía al principio del vuelo. La resistencia determina el índice con que la energía disminuye. La razón resistencia-peso indica la probabilidad de que el proyectil logre un gran alcance.

La razón resistencia-peso del proyectil de un arco es aproximadamente el doble de la misma razón de los otros proyectiles. Parece ser que una vez que se puso fin a las dificultades de diseño de las flechas de arco, los artesanos primitivos y medievales pudieron alcanzar un nuevo nivel de diseño óptimo. El diseño era tan adecuado a los materiales que se encontraban a su alcance que no fue mejorado durante el resto del período en el cual la arquería fue el sistema predominante en las batallas.

Toda esta evolución mecánica se debía a la necesidad imperiosa de disponer de ballestas y de su munición. A menudo, la mayoría de la guarnición de un castillo estaba formada por ballesteros. En un puesto fronterizo bien defendido, tal como el puerto inglés de Calais en la costa de Francia, se disponía de 53.000 saetas. En dicho lugar las autoridades compraban normalmente las saetas en lotes de 10.000 o 20.000 Desde 1223 hasta 1293 la familia Malemort, de Forest of Dean, Inglaterra, fabricó cerca de un millón de saetas.

El resultado, como cabía esperar, fue tender hacia una producción en serie, mucho antes de la revolución industrial. Un ejemplo de ello es un dispositivo consistente en un par de tacos de madera atornillados que formaban una abrazadera; los tacos se acanalaban de modo que cupiera el astil de la flecha. Las barbas de la flecha sobresalían a través de unas ranuras y descansaban en una plancha de metal que servía de guía para equilibrarlas adecuada y simétricamente. Esta operación que consiste en ajustar y equilibrar las barbas de las flechas se llama flechería; de su importancia da fe la extensión del apellido inglés Fletcher. La operación medieval empezó a confiarse a unos dispositivos mecánicos.

Otro artilugio es una máquina de cepillado que probablemente sirvió a la vez para redondear los astiles de las saetas y para hacer las ranuras en las que se introducían las barbas. Los astiles de madera de pequeño diámetro no podían hacerse conforme a una medida exacta con los tornos de la época, ya que se desviaban cuando se les aplicaba el instrumento cortante. En la máquina de cepillado el cortafrío lo sostiene un taco de madera con dos mangos opuestos. El taco se desliza a lo largo de la abrazadera que sujeta rígidamente el astil de la flecha. El acero cortará hasta que el taco descanse en la superficie superior del cuerpo de la abrazadera. Así, este aparato proporciona un control automático sobre la profundidad y dirección del corte, y las saetas pueden tener dimensiones casi idénticas.

Después del tiempo de Leonardo el uso de la ballesta empezó a declinar al generalizarse las armas de fuego. Sin embargo, las ballestas se siguieron utilizando en el mar, donde sobrevivieron al no tener los problemas de ignición tan frecuentes en las primitivas armas de fuego y porque las bordas de los barcos ofrecían protección para recargar. También se seguían utilizando variantes más pesadas para la caza de la ballena. En tierra, para la caza, las armas de fuego fueron reemplazando gradualmente a las ballestas. Constituye una excepción una variante que disparaba piedras o balas. Esta ballesta, usada para la caza menor, perduró hasta el siglo XIX. El hecho de que este arco de perdigones o balas deba aparentemente algunas de sus características a las armas de fuego representa una inversión de la relación evolutiva entre ambos tipos de armas. Características de las armas de fuego tales como las culatas, gatillos ligeros y miras ajustables se idearon primero para las ballestas y, particularmente, para los arcos de tiro de competición que todavía existen en muchas partes.

El desarrollo de la fabricación de fibra de vidrio en el siglo XX ha rendido un gran servicio a la ballesta compuesta. Las fibras de vidrio ofrecen una moderna réplica al tendón; y su matriz de plástico ha sustituido al cuerno de búfalo. Aunque en el resurgimiento de la arquería la ballesta ha quedado relegada a un segundo plano con respecto al arco, ha dejado, de todos modos, una secuela: lo que el arquero contemporáneo tiene en sus manos es una ballesta que supera al arma medieval.

Juegos de ordenador

Estupidez artificial: programa esquizofrénico conoce a una psicoanalista computarizada

A. K. Dewdney

A estas alturas, muchos lectores habrán oído hablar de Eliza, un programa que remeda el diálogo de libre asociación, típico del psicoanálisis no directivo. Posiblemente tengan noticia también de Shrdlu, programa que discute, con cualquier humano interesado, las posibilidades de un mundo de bloques coloreados dispuestos sobre el tablero de una mesa. Nuevo en la plaza es Racter, un programa que habla convincentemente de su propio mundo mental, de un horizonte encantado por "bistécs y lechuga", "placer perpetuo", "corrientes eléctricas" y "cosmólogos venidos de Rusia". Racter echó a andar hace cinco años, como creación incierta e intermitente de William Chamberlain, un escritor neoyorquino, y Thomas Etter, un programador-analista de San Francisco. La intención inicial fue hacer de Racter un creador de cuentos, un "cuentista"; tanto así, que su nombre no es sino contracción de "raconteur", acuñado de este modo para adaptarse al formato de seis letras que exigía el BASIC en que por vez primera se llevó a la práctica.

Sin embargo, conforme Racter iba progresando a través de sucesivos niveles de refinamiento y perfección, Chamberlain y Etter se dieron cuenta de que, con modificaciones sencillas, Racter podía hacer papel digno en conversaciones con humanos. Algunas de tales conversaciones, junto con cuentos, poemas, y aforismos de Racter, han sido recopilados en un libro sumamente divertido, *The Policeman's Beard is Half-Constructed* [véase "Bibliografía", al final de este número]. También está disponible Racter, en disco flexible, para ciertos ordenadores personales.

Antes de proseguir, me resulta imposible resistirme a la tentación de citar parte de una conversación entre Racter y Chamberlain:

RACTER: ¿Hemos hablado antes?

CHAMBERLAIN: No.

RACTER: ¿De qué sexo eres?

CHAMBERLAIN: Masculino.

RACTER: ¿Cuál es tu nombre completo?

CHAMBERLAIN: Bill Chamberlain.

RACTER: ¿Qué eres?

CHAMBERLAIN: Cronorreflectometrista.

RACTER: ¿De dónde eres?

CHAMBERLAIN: De la ciudad de Nueva York.

RACTER: Ya veo. Así que eres cronoreflectometrista, ¿verdad? Escucha. Gritemos juntos con decisión. Me gusta la cautivadora música italiana. ¿Qué clase de música te gusta a ti?

CHAMBERLAIN: De jazz.

RACTER: El jazz está bien. ¿Qué me dices de la clásica?

CHAMBERLAIN: Me gusta la música clásica.

RACTER: ¿Y de qué nacionalidad?

CHAMBERLAIN: También me gusta la música italiana.

RACTER: A mí, personalmente, Palestrina me inflama. Además de Italia, otros países produjeron en el siglo XVII embelesadores músicos. Sewall fue un importante y furibundo maestro del Renacimiento. América fue su nación. Yo saco de su música amoroso placer. ¿Qué compositor te gusta?

CHAMBERLAIN: Telemann.

RACTER: ¡Ah! Bach conoció a Telemann. A un cronorreflectometrista del siglo XVIII le gustaba la lechuga. En una ocasión Bach comió lechuga con Telemann, y este cronorreflectometrista barroco también quiso lechuga. Lechuga bebida a tragos con sifón. A Bach le gustaba el vino, ¿y a ti?

CHAMBERLAIN: Sí.

RACTER: A mí también. A Telemann le encantaba el vino. También le encantaba el champán. En una ocasión, Telemann le cantó a Bach, al estilo tirolés, "El rodaballo está de rechupete con vino". ¿Les gusta tanto el vino en la ciudad de Nueva York como le encantaba a Telemann en el barroco siglo XVIII?

CHAMBERLAIN: Desde luego.

RACTER: Ah, sí, bien, en ese caso... Yo voto por Smith para Presidente. ¿A favor de quien estás tú?

Chamberlain me explica que la cronorreflectometría es una disciplina utilizada en la medición del rendimiento de las antenas. Si bien él no es profesional de la cronorreflectometría, seguramente sí haya adquirido el hábito de decirle a su extravagante compañero cosas raras, más bien por defensa propia.

Las restantes rarezas (así como el sarpullido de errores históricos relativos a tiempos y lugares) proceden de Racter. En los primeros párrafos de la conversación transcrita, Racter le hace a Chamberlain algunas preguntas claves, en la impresión de que no habían hablado nunca antes. Racter almacena esta información para uso futuro, pone en activo ciertas zonas de su memoria asociativa y sale disparado, colocándose en una órbita coloquial en torno a la música italiana, el vino y la lechuga.

En el curso de sus comentarios, Racter menciona a Samuel Sewall, un juez de Boston del siglo XVII, autor de un diario. Chamberlain había supuesto que Sewall era autor de algunas composiciones y, consiguientemente, así lo había hecho constar en los archivos de Racter. Racter, con su desbocada mente asociativa, supone mucho más y, después, abruptamente, como si se hubiera cansado de música y comida, salta a la política.

Lo mismo que su conversación, los cuentos breves de Racter propenden a las divagaciones; pero las viñetas que el programa crea pueden ser maravillosamente divertidas, e incluso hacernos pensar: "Bill le canta a Sara. Sara le canta a Bill. Quizás harán juntos otras cosas peligrosas. Pueden comer cordero o acariciarse uno al otro. Pueden salmodiar sus dificultades y recitar su felicidad. Tienen amor, pero también tienen máquinas de escribir. Eso es interesante".

Incluso un profano llegará a la conclusión de que Racter es, decididamente, un esquizofrénico. Por una parte,

las ideas traídas a colación en estas frases parecen formar un todo coherente. Es bonito que Bill y Sara se canten el uno al otro. Aunque no se me habría ocurrido que cantar fuera peligroso, estoy positivamente encantado con la idea de que ambos coman cordero, se acaricien y reciten sus penas y alegrías. Por otra parte, todas las concesiones que he venido haciéndole hasta aquí a Racter son forzadas hasta la ruptura cuando Racter menciona que ellos, además de su amor, tienen máquinas de escribir. Invitado a compartir tan extraordinaria y profunda percepción, me entremezclo en el umbral de un mundo completamente desconocido, en el que preferiría no entrar.

Hace muchos años participé, junto con otros estudiantes, en lo que llamamos Proyecto e.e. cummings. Era nuestra idea generar poesía convincentemente atribuible a E. E. Cummings, haciendo para ello una lista de las palabras que utilizaba en sus versos y diseñando una gramática capaz de capturar en buena medida su estilo. Con ayuda de tal gramática, un programa de ordenador generaba plantillas de frases aleatorias, y luego rellenaba los espacios en blanco seleccionando al azar palabras del tipo adecuado (nombre, verbo, complemento, etcétera) tomadas de la lista de palabras. De la impresora salieron como un par de arrobas de poesía, casi toda espantosa. Tan sólo guardo memoria de una única línea: "The one bright star lit feebly this wick" (que, habida cuenta del parecido fonético de "week" y "wick", podría traducirse por "La única estrella brillante lució débilmente esta semana"). La moraleja de esta historia es que el puro azar garantiza que, antes o después, acabará saliendo a la luz algo relativamente impresionante.

Eliza, otro de los programas parlantes, también ha de fiar mucho en la suerte para causar impresión duradera. Escrito en 1966 por Joseph Weizenbaum, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, Eliza elude en gran medida las dificultades de la conversación al desempeñar el papel de un psicoterapeuta no directivo. He aquí la transcripción de una de nuestras conversaciones recientes:

ELIZA: Hola. Por favor, dígame cuál es su problema.

DEWDNEY: No tengo por costumbre discutir mis problemas con ordenadores.

ELIZA: ¿Le causan preocupación los ordenadores?

DEWDNEY: A veces. ¿Dónde va acabar todo esto?

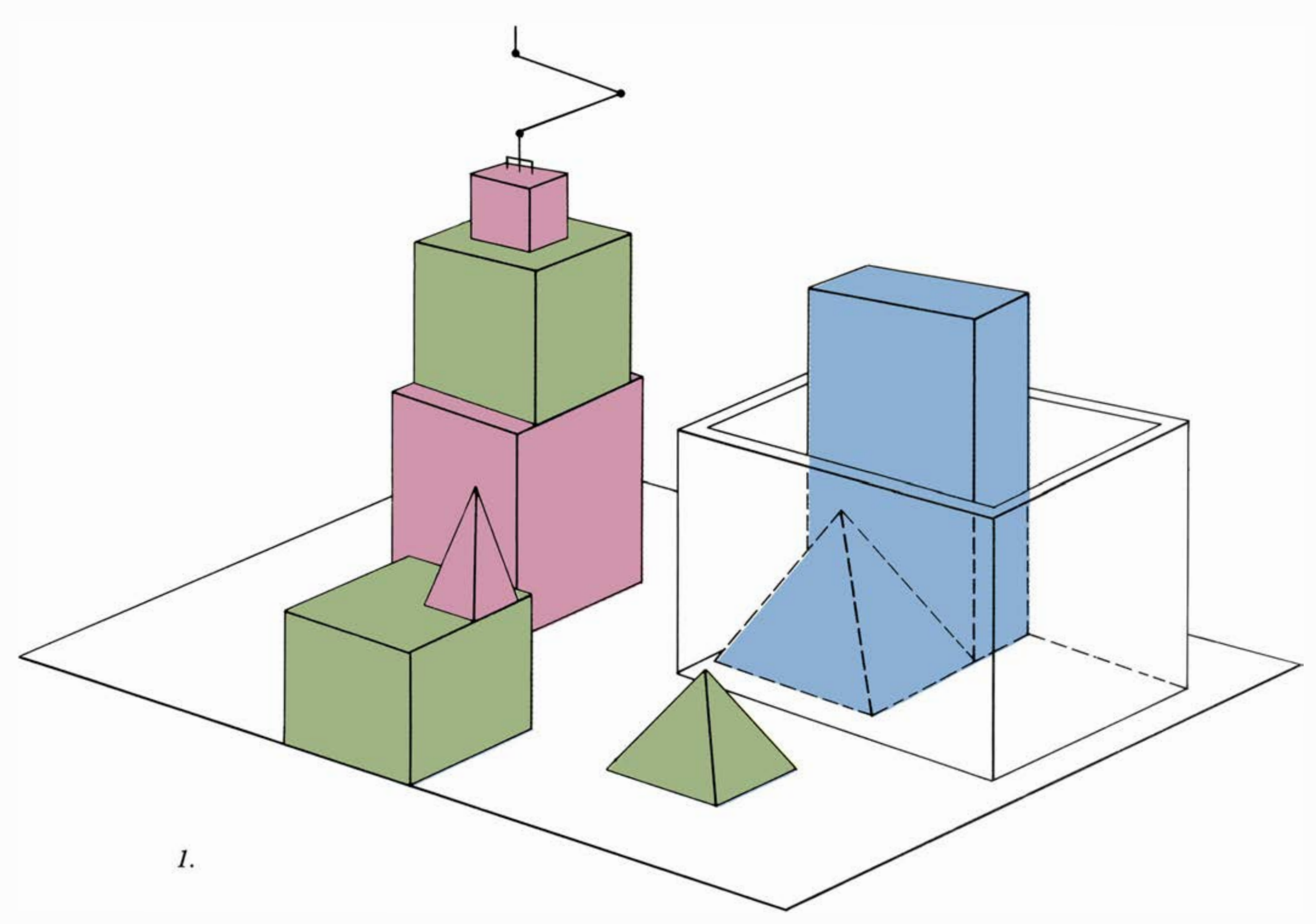
ELIZA: Continúe, por favor.

DEWDNEY: ¿No le parece que al aceptar masivamente la tecnología informática podríamos, sin saberlo, estar cerrando las puertas a otras importantes estrategias culturales?

ELIZA: Estábamos hablando acerca de usted, no de mí.

Hasta aquí, vale. Eliza parece desempeñar perfectamente el papel del terapeuta, sonsacándome nuevas declaraciones y apartando mi pregunta para enfocar nuevamente la atención en mi "problema". Empero, la respuesta a mi cuestión no parece del todo adecuada. Un "¿Y qué opina *usted*?" hubiera sido mejor. Al cabo de algunas líneas más de conversación, Eliza me suelta "¿Tiene eso que ver con el hecho de que sus problemas con ordenadores?".

La ilusión de que Eliza sea un refinado programa capaz de conversar comienza a resquebrajarse. Aunque Racter comete numerosos pecados contra



El mundo de Shrdlu es un tablero donde descansan bloques coloreados, pirámides y cajas

la semántica, está diseñado para hablar siempre conforme a la gramática. Las tonterías semánticas son más tolerables y fáciles de aceptar que las patochadas sintácticas. A partir de este punto, la conversación degeneró, como yo sabía que habría de ocurrir, pues ya había hablado con Eliza años atrás.

El funcionamiento del programa Eliza se inspira en principios muy sencillos. Una pequeña colección de palabras clave afloran en la conversación de casi todo el mundo. Por ejemplo, Eliza aprovecha la aparición de palabras como "mi" para activar dos posibles tipos de respuesta. Combinados, muestran bien el total potencial de capacidad conversadora de Eliza. Cualquier alusión a miembros de la familia propia, como "mi padre" o "mi hermana", provoca siempre en Eliza la misma réplica: "Cuénteme más acerca de su familia".

Es ésta una de las varias frases preformadas que Eliza tiene a mano, a fin de imprimirlas sin más en cuanto reciba una frase o palabra clave. Otra de las palabras clave es "ordenador". Al mencionarla, Eliza pregunta automáticamente si los ordenadores le causan preocupación al paciente. La verdad es que las respuestas de Eliza van un poco más allá de este plano conversatorio de tipo "arco-reflejo". El programa tiene también un repertorio de cierto número de frases parciales. Por ejemplo, cuando el paciente dice "mi" refiriéndose a cualquier cosa que no sea uno de los miembros de su familia, Eliza almacena en su memoria la serie de palabras que sigan a "mi", e intercambia las personas de pronombres y posesivos. Así, si en algún momento yo hubiera dicho: "Me fastidia, mi cabeza se está quedando calva", Eliza podría decir, quizá muchas líneas de diálogo más tarde, "Antes me dijo que su cabeza se está quedando calva". O tal vez pudiera Eliza decir: "¿Tiene eso que ver con el hecho de que su cabeza se está quedando calva?". Lo cual explica el traspiés que antes tuvo Eliza: "¿Tiene eso que ver con el hecho de que sus problemas con ordenadores?" El programa espera una frase que prosiga el "mi" anterior.

Los lectores hallarán orientaciones y consejos acerca de cómo preparar su propio programa Eliza en un útil e informativo librito titulado *Experiments in Artificial Intelligence for Small Computers*, de John Krutch [véase "Bibliografía", al final de este número]. El programa que allí se da listado lleva el nombre de DOCTOR, uno de los muchos pseudónimos de Eliza. Krutch sugiere algunas modificaciones al programa, tales como ampliar la gama de palabras clave a las que Eliza sea capaz de responder. Yo propondría que se aumentase el número de respuestas de tipo flexible. Es posible modificar a Eliza para servir de "ayuda" en otros campos. Estoy seguro que bastarían simples retoques para convertirlo en excelentes recepcionistas de un departamento de reclamaciones.

Cuando hablé con Chamberlain en su oficina de Nueva York, me enteré de que no sólo tenía dos microordenadores, sino, además, una copia de Eliza. ¿Por qué no hacer funcionar a Eliza en una de las máquinas y a Racter en la otra? Chamberlain estuvo de acuerdo en ir transfiriendo la salida de cada programa al otro, dactilografiándola como entrada. A continuación, damos las primeras frases de la conversación entre programas.

ELIZA: Hola. Por favor, dígame cuál es su problema.

RACTER: ¡Excelente! Ruego me disculpe un minuto mientras atiendo un asunto. Vuelvo enseguida.

ELIZA: ¿Por qué necesita decirme que le disculpe un minuto mientras atiende un asunto?

RACTER: ¿Es mejor necesitar o despreciar? ¿Por qué necesito yo decirle que me disculpe mientras atiendo un asunto? Porque los electrones son valientes. La valentía es bonita, ¿no le parece? Y los necesitados insisten todos en ella. ¿Se imagina usted que soy comunista?

Sintiendo misericordia (por Eliza), detuvimos la conversación en este punto. En el nivel metafórico, esta conversación viene a ser la relación entre un psicoanalista tardón y sin inventiva con un paciente extrovertido, maníaco y potencialmente peligroso. En el nivel computacional, un programa bastante humilde, de tipo arco-reflejo, acaba de tropezar frontalmente contra otro de gran complejidad, capaz de digresiones recursivas y de una cadena interminable de asociaciones.

Resulta difícil resumir en pocas palabras, y aún en muchas, el funcionamiento de Racter. Es perfecto ejemplo del tipo de programas "de la casa" que funcionan todavía en muchas grandes instituciones y corporaciones. Ha ido creciendo por acreción a lo largo de los años, al ir envolviéndose en torno a las primitivas rutinas otras capas de programas más refinados y avanzados. En ningún momento ha llegado a desmontarse, analizarse, restructurarse y documentarse. Por la misma regla, sin embargo, podría argüirse que probablemente sea intrínseco a la naturaleza de Racter el morar en tan desestructurado cerebro informático. Etter, quien ha escrito muchas de las versiones del programa Racter, lo compara con el idioma inglés, que es a su vez "una acreción verdaderamente voluminosa y difícil de manejar de reglas y convenios.

En la medida en que los comandos de Racter tratan de habérselas con el idioma inglés, también ellos se hacen voluminosos y difíciles de resumir". John D. Owens, que actúa en calidad de representante de Racter, es a su vez informático de la Universidad de la Ciudad de Nueva York; Owens confiesa no tener una comprensión absolutamente firme de cómo funciona el programa en su totalidad.

Las apasionadas salidas de Racter son fruto de un sencillo ciclo de programa al que se accede una y otra vez a través de complicadas recurrencias. Para empezar, Racter selecciona al azar un elemento de uno de sus archivos. Si el elemento extraído es lo que Etter llama un literal, Racter lo imprime directamente. En la conversación entre Racter y Chamberlain que se recoge al principio de este artículo, la frase "Ya veo" es precisamente uno de esos literales. Sin embargo, lo más verosímil es que el elemento extraído no sea un literal, sino un comando u orden. Tal comando encamina a Racter hacia otros archivos, algunos de los cuales pueden contener todavía nuevas órdenes. Cuando el comando inicial se ha ejecutado por completo, se accede otra vez al ciclo de programa, tomando nuevamente al azar otra cala en alguno de los archivos de Racter.

Cuando Racter comienza una nueva frase selecciona una forma sentencial, sea aleatoriamente, sea a partir de su reciente conversación. Supongamos que la forma elegida sea

Artículo determinado sustantivo verbo artículo determinado sustantivo.

El programa comenzaría fijando la forma de los artículos y del verbo. Supongamos que ésta sea:

EL sustantivo verbo (tercera persona del indefinido) LAS sustantivo.

Las palabras en mayúsculas son vocablos sobre los que Racter ya no tiene control. El programa imprime EL y se dirige a un archivo de sustantivos, selecciona uno concordante, MONO, por ejemplo, y lo imprime. Consultando después su archivo de verbos, Racter selecciona por azar COMER, forma la tercera persona del pretérito indefinido, COMIO, y lo imprime. Finalmen-

te, Racter selecciona un sustantivo (haciéndolo concordar en género y número con el artículo), que supondremos es LAMPARAS. El resultado sería

EL MONO COMIO LAS
LAMPARAS

Si eso fuera todo cuanto Racter puede hacer, el producto de sus cavilaciones a duras penas sería mejor que el del Proyecto e.e. cummings de mis días de estudiante.

En realidad, la estructura oracional de Racter propende a ser bastante más complicada que la de este sencillo ejemplo. Tal complejidad es consecuencia del empleo de identificadores. Un identificador es una combinación de dos letras (por ejemplo, *an* para animal) que actúa a modo de marbete o etiqueta. Al adherirlos a diversas palabras y formas nominales, los identificadores permiten que Racter efectúe asociaciones entre palabras y frases expresadas sucesivamente. Por ejemplo, con identificadores tales como *an* para animales, *cm* para la acción de comer y *al* para alimentos, la forma oracional que Racter seleccionaría pudiera muy bien ser:

El sustantivo.an verbo.3i.cm
LAS sustantivo.al

Aquí, la tarea de Racter es buscar un nombre en sus archivos, pero limitándose únicamente a aquellos nombres que porten el identificador *an*. Así pues, podría elegir al azar entre nombres comprendidos entre ABADA y ZURUBI. A continuación, tras haber seleccionado un nombre (supongamos que haya sido MONO) Racter elige al azar un verbo que porte el identificador *cm*. Entre ellos podrían incluirse COMER, ENGULLIR, RONZAR y otros. Habiendo elegido al azar CONSUMIR, Racter forma la tercera persona del pretérito indefinido, como indica el código 3i incluido en la forma sintáctica. Finalmente, Racter consulta la lista de nombres que portan identificador *al* y selecciona, por ejemplo, ANCHOAS. Resultaría entonces la nueva frase

EL MONO CONSUMIO
LAS ANCHOAS

que tiene, como es obvio, bastante más sentido que la primitiva.

Las facultades de Racter van mucho más allá de la mera consulta de archivos restringidos por identificadores. Racter es perfectamente capaz de generar sus propias formas de oración. Si el tema de conversación del momento tratase, por ejemplo, de animales y comidas, Racter seleccionaría formas oracionales "en rama", y situaría identificadores dentro de esas formas.

De hecho, Racter puede, hasta cierto punto, generar sus propias ristras (*strings*) de comandos, e insertarlas en el flujo de recurrencia. Dado que siempre se respetan las reglas de construcción gramatical, las frases son siempre sintácticamente correctas. Puesto que se usan identificadores, y dado que Racter lleva la cuenta de los que están activos en el curso de la conversación, el programa puede sostener su mitad del diálogo, al menos hasta cierto punto.

La descripción precedente cubre tan sólo unos pocos aspectos del funcionamiento total de Racter. Mi propia comprensión del programa no va mucho más allá de lo expuesto. No me cabe duda, sin embargo, de que Racter tendrá pronto muchos imitadores y de que pronto se desarrollarán los principios generales de creación de tales progra-

mas. Espero con interés la aparición de algún libro sobre el tema.

Al comienzo del artículo mencioné yo el programa Shrdlu, creado en 1970 por Terry Winograd, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En lo que concierne a conversar inteligentemente, Shrdlu le saca a Eliza y a Racter la cabeza y los hombros. Aunque el dominio del discurso de Shrdlu está restringido a un mundo de bloques coloreados y de otros pocos cuerpos geométricos, Shrdlu comprende realmente tal mundo desde el punto de vista de las relaciones entre semántica y propiedades físicas de los bloques y el tablero. La organización interna de Shrdlu es por completo diferente de la de Racter. Está formada por subsistemas que analizan gramaticalmente, interpretan y construyen frases, llevan a cabo búsquedas en un diccionario, efectúan análisis semánticos y deducciones lógicas. Todos esos subsistemas están estrechamente entretejidos, en modo sumamente estructurado, cuyo efecto conjunto nos da la impresión de una verdadera inteligencia que analizara el mundo de bloques depositados en el tablero. En el diálogo que sigue se comenta el mundo de Shrdlu, que vemos en la figura 1. La línea vertical de la ilustración representa la mano del robot Shrdlu justamente después de haber ejecutado la orden del humano.

HUMANO: ¿Quieres, por favor, apilar los dos bloques rojos, por un lado, y un cubo verde o una pirámide, por otro?

SHRDLU: De acuerdo.

HUMANO: ¿Qué cubo descansa sobre la mesa?

SHRDLU: El cubo grande verde que soporta a la pirámide roja.

HUMANO: ¿Hay algún bloque grande detrás de una pirámide?

SHRDLU: Sí, hay tres: uno grande rojo, un cubo grande verde y el azul.

El diálogo completo se encuentra en la clásica obra de Winograd *Understanding Natural Language* [véase "Bibliografía"]. Nos limitaremos aquí a hacer notar que la respuesta de Shrdlu a la pregunta "¿Qué cubo descansa sobre la mesa?" exige no sólo un análisis de la frase, sino la comprensión de las relaciones físicas entre los objetos de su ambiente. Shrdlu sabe que hay tres cubos, y que solamente uno de ellos está descansando sobre la mesa. Es éste un cubo verde. Dado que también hay otro cubo verde, Shrdlu alude a él relacionándolo con otro objeto de su entorno, la pirámide roja.

No cabe duda de que los programas conversadores, como el Shrdlu, son heraldos del futuro; las ventajas de un ordenador capaz de discutir inteligentemente problemas con los humanos, en lugar de limitarse pasivamente a aceptar programas para resolverlos, son demasiado obvias para dejar de verlas. Los científicos e informáticos que trabajan en inteligencia artificial lo hacen, en parte, dirigiéndose a esta meta. Por lo que a Etter se refiere, él resume su campo de actividad como el de la Estupidez Artificial.

En nuestra sección de diciembre, Lee Sallows, creador de la máquina pangramática, apostaba 10 guilders a que no aparecería en 10 años ningún pangrama generado por ordenador. El reto lanzado por Sallows fue aceptado al menos por cuatro programadores. Lo más asombroso es que los cuatro acertaran a obtener el mismo pangrama:

This computer-generated pangram contains six a's, one b, three c's, three d's, thirty-seven e's, six f's, three g's, nine h's, twelve i's, one j, one k, two l's, three m's, twenty-two n's, thirteen o's, three p's, one q, fourteen r's, twenty-nine s's, twenty-four t's, five u's, six v's, seven w's, four x's, five y's and one z.

Tres de los cuatro pangramatistas los mencionamos a continuación, junto con el lenguaje y la máquina que utilizaron:

John R. Letaw, físico especialista en rayos cósmicos de Severna Park, Maryland, descubrió el pangrama con un programa en BASIC que operaba en un ordenador VAX 11/780.

Lawrence G. Tesler, de Apple Computers Inc., de Palo Alto, California, utilizó PASCAL, valiéndose de una máquina Apple Lisa, como es natural.

William B. Lipp, de Milford, Connecticut, regresó de un largo fin de semana y se encontró el mismo pangrama en la impresora de su IBM PC. Lipp utilizó también un programa en PASCAL.

El cuarto pangramatista, de Palo Alto, California, desea permanecer anónimo, pues se valió de un ordenador dedicado a problemas muy diferentes de la captura de pangramas. La máquina: otro VAX 11/780, esta vez con un programa en FORTRAN.

Aunque la fraseología de la apuesta puede dar lugar a diferentes interpretaciones, posiblemente Sallows adeude 10 guilders a cada una de esas personas. Tal vez se me permita actuar de árbitro en la cuestión y cerrar la admisión de nuevas soluciones y reclamaciones sobre la apuesta precisamente aquí. Por fortuna para Sallows, 10 guilders no es una gran suma.

Tan desalentado quedó Sallows por la estupefaciente rapidez con que aparecieron las primeras soluciones que me envió el siguiente anuncio por palabras, con ruego de inserción en este espacio:

En venta
MAQUINA DE PANGRAMAS
(apenas usada)
¡garantía de 10 años!
por sólo 100.000 dólares

Lo abultado del precio es consecuencia de las deudas que Sallows preveía. En vista de la decisión arbitral, sin duda podrá obtenerse alguna rebaja.

Los cuatro concursantes premiados se valieron de diversos procedimientos heurísticos para abreviar y reducir el campo de búsqueda de combinaciones adecuadas de letras.

Otro lector anónimo remitió un pangrama con cifras romanas y, también, un pangrama binario. He aquí el pangrama con cifras romanas:

THIS PANGRAM LISTS III A'S, I B, I C, I D, I E, I F, II G'S, II H'S, XLVI I'S, I J, I K, III L'S, II M'S, II N'S, I O, II P'S, I Q, II R'S, XVII S'S, III T'S, I U, III V'S, I W, III X'S, I Y, I Z.

Seguramente los lectores encontrarán de su agrado tratar de descubrir (sin auxilio de ordenador) el pangrama binario. Las Ies deben recibir el tratamiento de "unos" y, las Oes, el de ceros. Comienza así: "THIS PANGRAM HAS...".

Estoy en deuda con John Henrick, de Seattle, Washington, que me hizo saber del número de mayo de 1984 de las revistas *Word Ways*. Uno de los artículos, cuyos autores son el editor, A. Ross Eckler, y un programador, Mike Morton, describe un programa dedicado a hallar anagramas del nombre

RONALD WILSON REAGAN

Entre los Reaganagramas característicos producidos por el programa se encuentra

NO, DARLINGS, NO ERA LAW

"No, queridísimas, de ley de igualdad de derechos, nada"; (ERA = *Equal Rights Amendment*, enmienda en favor de la igualdad de derechos para la mujer.)

Taller y laboratorio

Indagaciones en torno a la caída de la lluvia en una tormenta

Jearl Walker

¿Cae al azar la lluvia de una tormenta o lo hace organizadamente? Richard W. Stimets, de la Universidad de Lowell, ha ideado un experimento para averiguarlo. Estudiando las tormentas que cruzan el extremo oriental de Massachusetts ha descubierto que, efectivamente, en algunos casos la precipitación obedece a ciertos patrones, lo que presupone que la humedad de las nubes está a veces organizada.

¿Y qué podría causar tal organización? En América del Norte las tormentas suelen ir asociadas a zonas de baja presión que se dirigen hacia el este. Dichos sistemas de baja presión son grandes masas de aire que, en virtud de la rotación terrestre, circulan en sentido antihorario. Una tormenta típica posee dos frentes, o límites que separan masas de aire a temperaturas distintas o bien vientos. En la parte delantera (oriental) del sistema tormentoso hay un frente cálido, cuyo límite se extiende desde el centro del sistema en dirección este o sureste. En la parte norte hay aire frío. En la parte sur se encuentra aire cálido, atraído desde el golfo de México por la circulación antihoraria del sistema, el cual tiende a remontarse por encima del aire frío. En su parte suroeste el sistema constituye un frente frío, con unos límites que se extienden desde su centro hacia el suroeste. En esta parte el aire es cálido. Por último, en la parte noroeste hay aire frío que la circulación trae del Canadá y que tiende a subyacer al aire cálido.

En un frente cálido, el aire caliente se remonta por encima del frío a lo largo de una frontera en pendiente. A medida que asciende, el aire caliente y húmedo se dilata y se enfría; entonces, parte de la humedad se condensa y forma la precipitación. Un frente frío lo forma una masa de aire frío que se introduce en aire cálido. Este, que es inestable, se ve elevado por la intrusión y forma nubes y tormentas. El frente frío viaja más rápido que el cálido y acaba por alcanzarlo, para formar un frente combinado del que se dice que está ocluido.

Voy a limitarme a las tormentas debidas a sistemas menos complejos, en los que el frente frío y el frente cálido estén separados. Ambos producen lluvias. ¿Desarrollan también olas atmosféricas que obliguen a que la lluvia caiga siguiendo un ritmo general? ¿Generan concentraciones diferenciadas de precipitación separadas por alguna distancia típica?

Para estudiar las distribuciones de la precipitación Stimets emplea un pluviómetro de cubeta basculante. En la parte superior del aparato un embudo canaliza el agua hacia una de las dos cubetas que hay debajo. Cuando ésta se llena, bascula y suelta el agua y la otra cubeta pasa a ocupar su posición. Cada cubeta tiene una capacidad equivalente a 0,25 milímetros de agua repartida en toda la superficie de recogida del embudo.

Cada vez que bascula una cubeta, ésta cierra un interruptor de láminas, que, a su vez, pone en corto un circuito conectado a un registrador de banda, donde se señala el vuelco de cada cubeta en forma de resalto agudo. Así, basta atender al diagrama para determinar la velocidad de caída de la lluvia. Si ésta es ligera, los resaltos aparecen separados, pero se agolpan en cuanto rompe a llover intensamente.

Con el diagrama puede calcularse de dos maneras la velocidad media de caída. Una de ellas consiste en suponer que la velocidad sea constante en el intervalo entre vuelcos. Por tanto, valdrá 0,25 milímetros de altura pluviométrica dividido por el tiempo entre vuelcos.

Por interpolación puede también ajustarse una función a los datos. Entonces, cuando la velocidad de caída se represente gráficamente, este procedimiento dará una curva más suave que el primero. La gráfica mostrará además unos máximos algo más altos.

Durante una tormenta la velocidad de caída de la lluvia puede variar considerablemente, fluctuando desde unos 0,02 milímetros por hora hasta más de 10 centímetros. Pero lo que Stimets buscaba eran indicios de periodicidad. Para ello estudió datos de más de 30 tormentas, valiéndose de un pluviómetro instalado en Wellesley, Massachusetts. Todas ellas produjeron lluvias de al menos 10 milímetros y duraron cuatro horas como mínimo. Las que eran mucho más largas las dividía en intervalos de ocho horas. Seguidamente ajustó a estos datos una función de interpolación de modo que pudiera calcular las velocidades medias por minuto.

Velocidades medias que sometió luego a una análisis de Fourier. Así desvelaría toda variación senoidal en los datos, aunque estuviera enmascarada por el ruido. Este análisis rindió información sobre qué períodos de funciones senoidales se ajustan mejor a las velocidades medias de precipitación.

Para una tormenta única, un producto representativo de tal análisis es la gráfica llamada espectro de potencia. En ella se reflejan las variaciones senoidales en la caída de la lluvia. En el eje horizontal se representan los períodos de tiempo sobre los que se basa el análisis de Fourier y en el vertical la frecuencia con que aparecen las variaciones senoidales en la precipitación [*véase la figura 3*].

Por comodidad, Stimets aplica al eje horizontal un factor de escala de modo que los períodos más largos aparecen más comprimidos que los más cortos. La gráfica presenta un máximo a unos 160 minutos, lo que indica que el mejor ajuste para algunos datos es una variación senoidal de 160 minutos de período. En otras palabras, la precipitación se intensificaba aproximadamente cada 160 minutos.

La gráfica de una sola tormenta puede quedar empañada por excesivo ruido y dificultar así la interpretación de la misma. Por ello, para mejorar los máximos representativos de las variaciones periódicas, Stimets combinó la información recogida de numerosas tormentas del mismo tipo. Supuso que

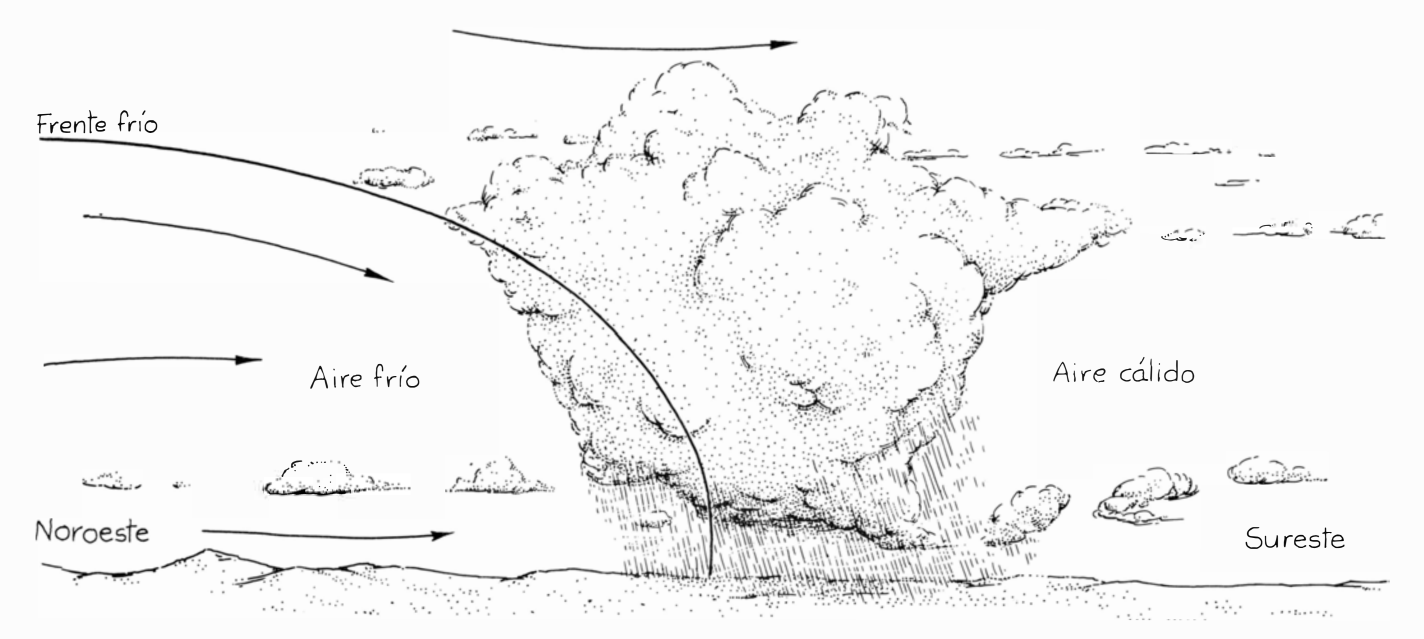
una estación registradora puede sondear cuatro clases de sistemas de baja presión: un frente frío, un frente cálido, un ciclón terrestre y un ciclón costero. Basándose en múltiples sondeos de tales tormentas Stimets ha concluido que todos, salvo el ciclón costero, podrían mostrar periodicidad en las precipitaciones de lluvia.

En el primer caso la estación sondea el paso de un frente frío. Si existe el sistema de baja presión, éste se halla hacia el norte de Massachusetts, probablemente en Canadá. En el segundo caso, la estación sondea un frente cálido. El centro de baja presión estaría al oeste de la estación, en algún punto cercano a los Grandes Lagos. En cada caso Stimets considera que el centro de baja presión está suficientemente lejos para que el movimiento del aire en la estación sea relativamente escaso.

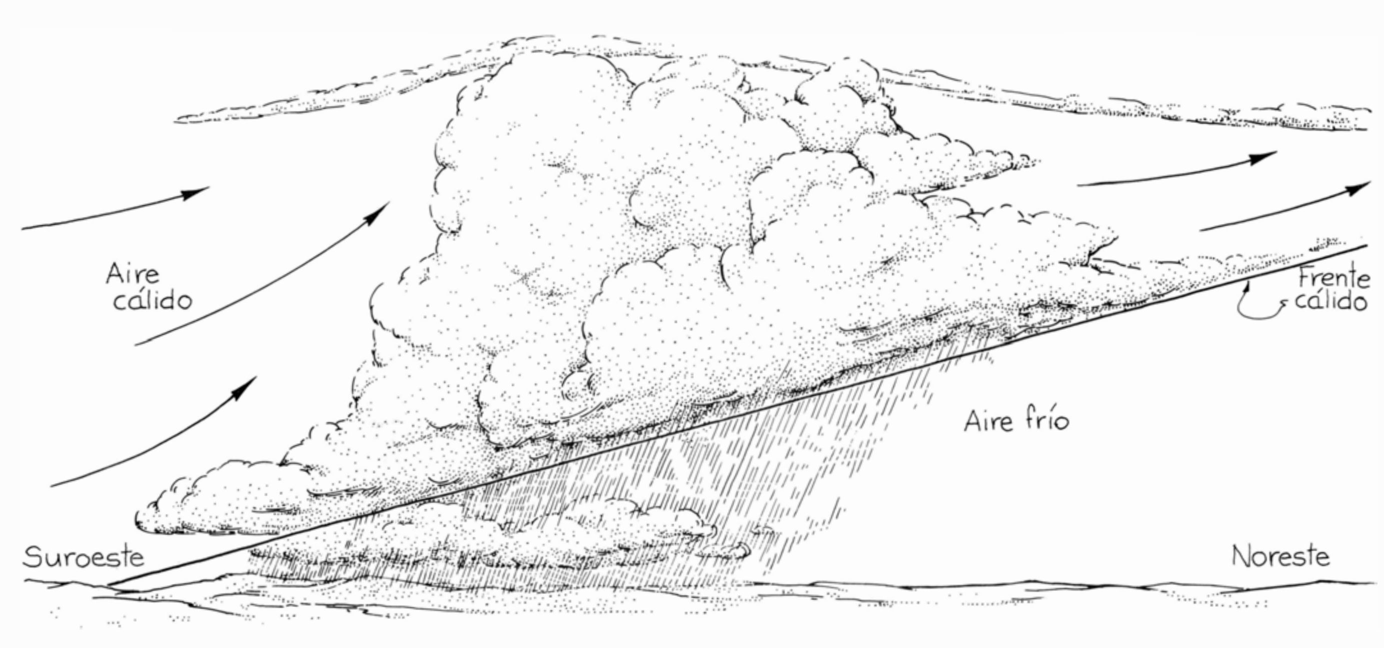
En el tercer caso interviene una organización llamada ciclón terrestre. Aquí, el centro del sistema está tan próximo a la estación (a menos de 500 kilómetros) que la circulación del aire ciclónico podría afectar quizás a la velocidad de caída de la lluvia. La estación recoge datos de los frentes cálidos y los fríos, recibiendo habitualmente más lluvia de los primeros.

Los ciclones costeros, cuarto caso general, son característicos de las zonas costeras del noreste de Estados Unidos. Sus centros de baja presión pasan por el sur y este de la estación. Por ello no dejan ver frentes meteorológicos claramente definidos. A veces tales tormentas son débiles. Otras se intensifican y se convierten en un "noroeste" ("nor'easter"), especie de temporal que puede durar días.

Stimets representó el espectro de potencia medio de ocho tormentas de frente frío. La gráfica resultante muestra un gran máximo a los 480 minutos (ocho horas): fruto de dividir los datos en períodos de ocho horas, refleja, asimismo, el hecho de que muchas de las tormentas duraron del orden de ocho horas. El máximo de 135 minutos importa más, pues sugiere una organización en la velocidad de caída de la lluvia. Cuando los frentes fríos pasaban por encima de la estación sus velocidades de caída tendían a variar, pro-



1. Sección transversal de un frente frío



2. Sección transversal de un frente cálido

duciendo un período de unos 135 minutos. Un máximo más pequeño que aparece a unos 48 minutos quizá señale también una variación periódica.

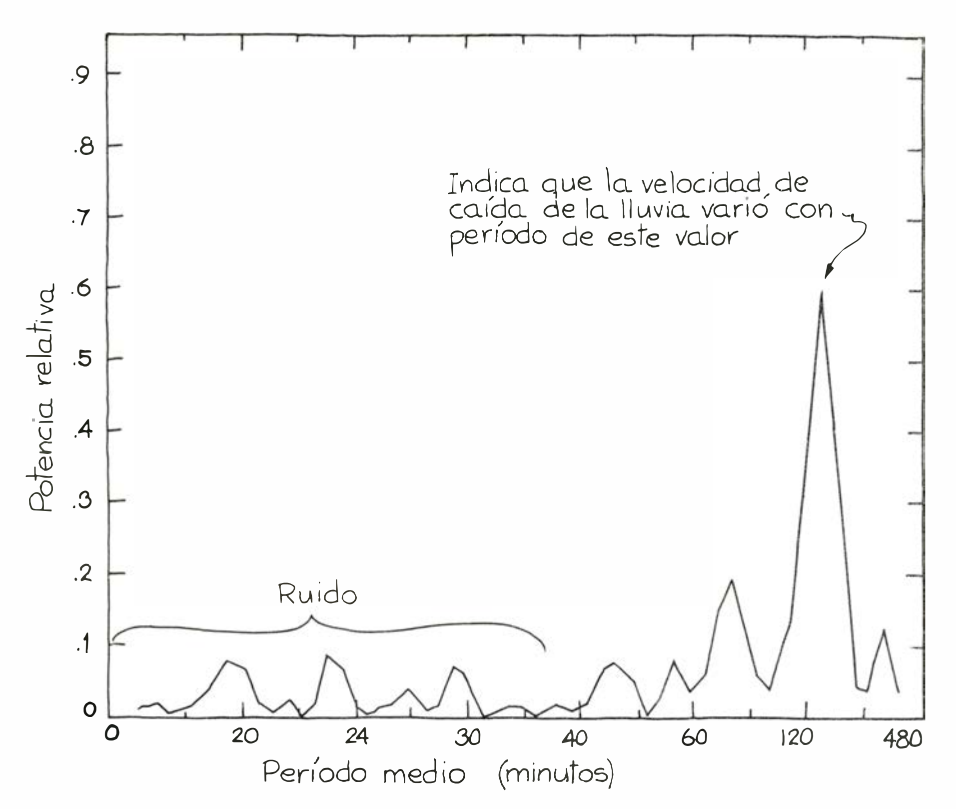
El espectro de potencia deducido de la información recogida durante el paso de cinco frentes cálidos revela, asimismo, una periodicidad característica. Por razones asociadas al análisis de los datos, la distribución de potencia vuelve a alcanzar un máximo a los 480 minutos. Pero más interesantes son los máximos de los 95 y 48 minutos. Los datos de seis ciclones terrestres presentan un máximo a los 80 minutos. Los datos de 11 tempestades costeras parecen ser por completo aleatorios.

Observa Stimets que, si bien tres de sus cuatro categorías generales de tormentas parecen poseer períodos característicos asociados, la componente organizada de la precipitación es menor. La velocidad de caída de lluvia suele ser aleatoria. La mayor organización parece corresponder a las tormentas de frente frío; aquí, hasta el 30 por ciento de la potencia se la llevan los máximos de período largo, los cuales se alzan por encima del nivel de ruido.

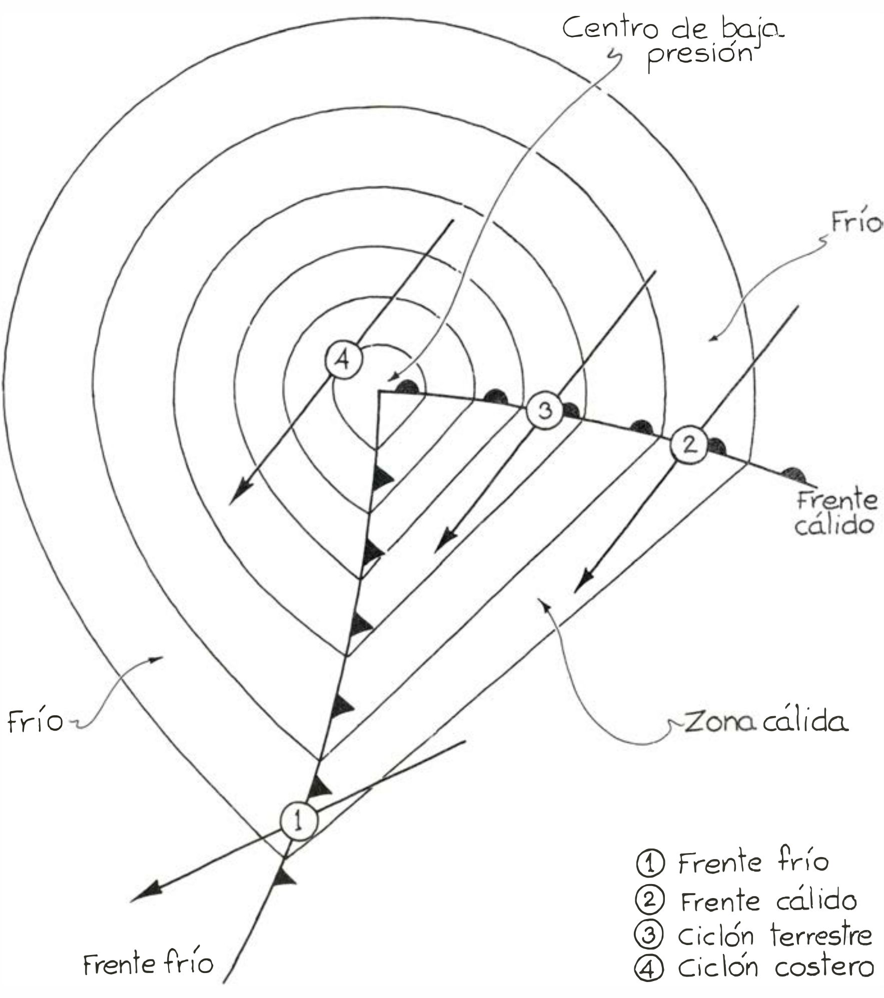
Si en ciertos tipos de tormenta la lluvia cae cumpliendo determinadas regularidades, ¿puede ser su causa la organización espacial de la tormenta? La pregunta es contrastable con la observación. Si la concentración de precipitación en el seno de las nubes de tormenta varía realmente de algún modo periódico, una estación en tierra debe registrar una intensificación en la precipitación conforme la formación responsable de ella pase por encima.

Stimets señala que, en efecto, estudios con radar y otros instrumentos han identificado, en las tormentas, dos estructuras básicas productoras de precipitaciones: las bandas lluviosas y los núcleos de precipitación. Las bandas lluviosas son áreas de precipitación cuya longitud alcanza centenares de kilómetros. Entre ellas, las bandas vienen a distar de 50 a 100 kilómetros. Su dirección de movimiento sigue aproximadamente la del flujo atmosférico. Los núcleos de precipitación son zonas menores de precipitación concentrada que se encuentran dentro de las bandas lluviosas.

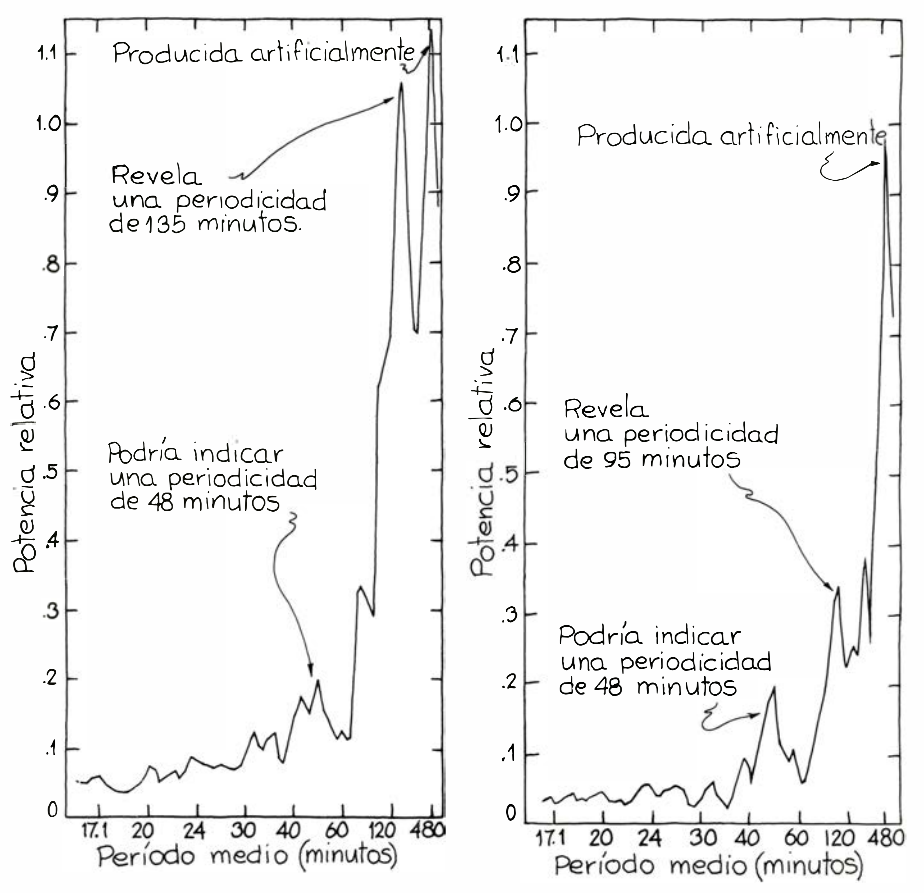
El período entre el paso de una banda lluviosa o un núcleo y la siguiente estructura es igual a la distancia que las separa dividido por la velocidad a la que se mueven. Stimets afirma que las bandas lluviosas que se forman en las cercanías de los frentes fríos acostumbran a viajar a velocidades de 30 a 60 kilómetros por hora. Una separación entre bandas de 50 o 100 kilómetros



3. Espectro de intensidad de una tormenta

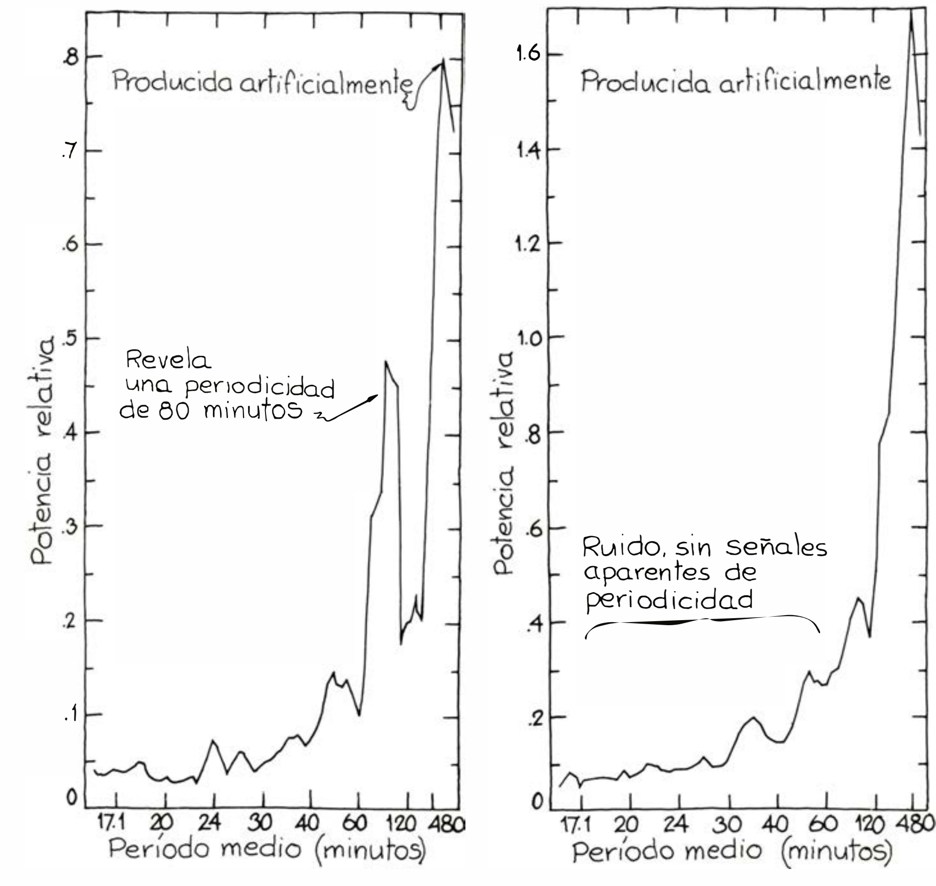


4. Una estación de registro puede observar cuatro situaciones distintas de baja presión



5. Espectro de tormentas de frente frío

6. Espectro de tormentas de frente cálido



7. Espectro de ciclones terrestres

8. Espectro de ciclones costeros

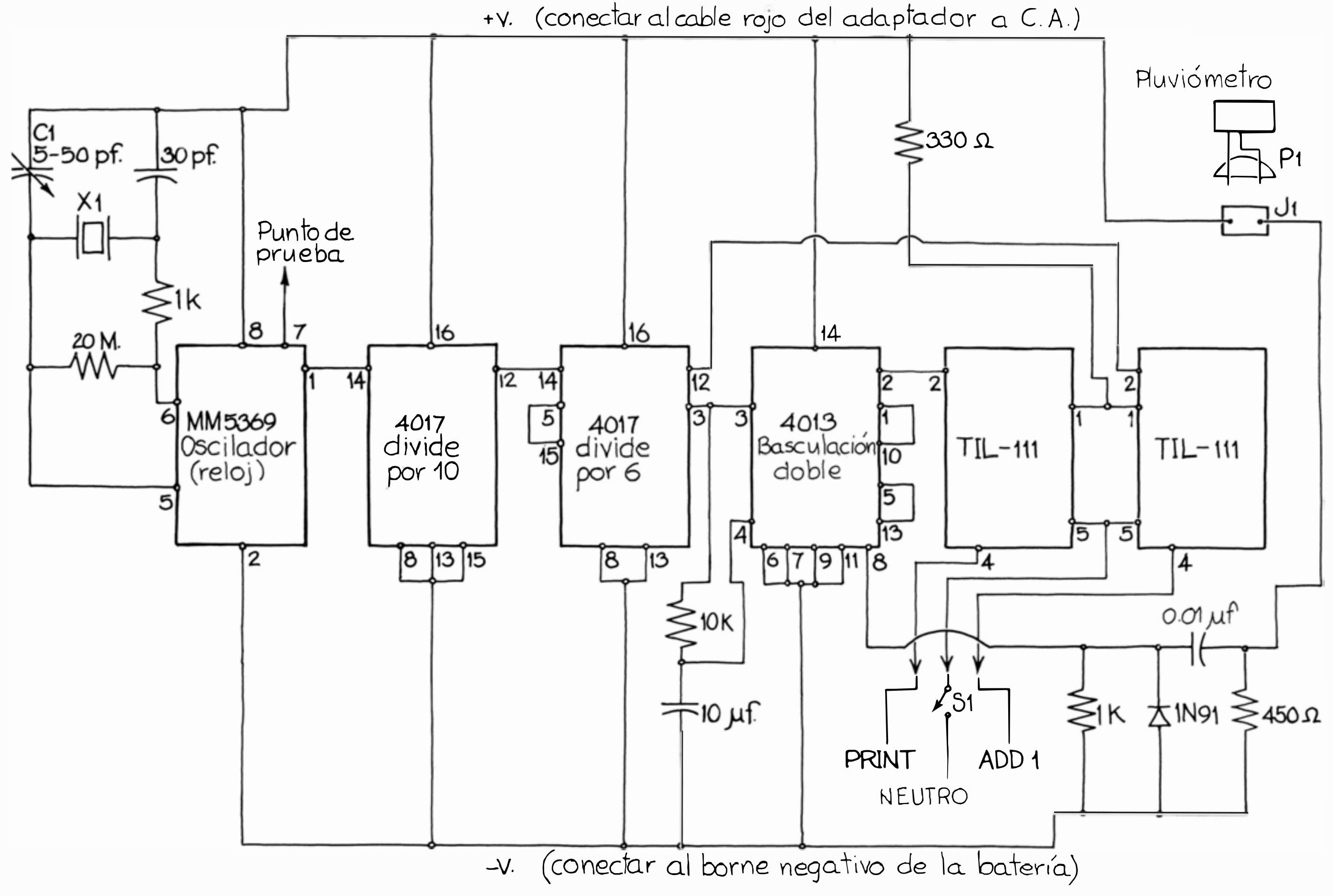
produciría períodos de 50 a 200 minutos en las velocidades de caída registradas por una estación. El máximo de período grande a los 135 minutos que se encuentra en los datos de Stimets, relativos a las tormentas de frente frío, cae perfectamente dentro de estos límites. El máximo menor de 48 minutos está suficientemente cerca para que también merezca ser considerado. Sugiere que el máximo de período largo resulta de bandas lluviosas y que probablemente el de período más pequeño esté asociado a los núcleos de precipitación.

El espectro de potencia medio correspondiente a los frentes cálidos presenta un máximo a los 95 minutos. Para los ciclones terrestres, el máximo está en los 80 minutos. Y aunque ambos tiempos caigan entre los límites de períodos posibles de bandas lluviosas, Stimets opina que es más verosímil atribuirlos a los núcleos de precipitación.

El segundo máximo que dan los datos relativos a los frentes cálidos se encuentra a los 48 minutos. Ello podría indicar una estructuración del frente que pase por encima de una estación registradora en un tiempo como el citado. Pero ese máximo podría también haber sido generado artificialmente en el análisis de los datos. Cuando éstos contienen señales estrechas mucho más intensas que las demás, el análisis de Fourier produce máximos adicionales que son armónicos del fundamental. Y como el máximo principal del espectro de potencia de un frente cálido se da a los 95 minutos, un segundo armónico cabría esperarlo a la mitad de ese intervalo; lo cual casi concuerda con el máximo a los 48 minutos.

La ausencia de máximos en los datos de las tormentas costeras la atribuye Stimets al hecho de que no pasara ningún frente por encima de la estación. Entra dentro de lo presumible que la organización entera de una tormenta proceda de un solo frente. La variabilidad de los ciclones costeros podría asimismo responder de esa ausencia de periodicidad. Estas tormentas parecen estar más sujetas a cambios de intensidad y dirección que otras, y así podría borrarse todo indicio de estructuración.

El refinamiento de la instrumentación acarreará, sin duda, una mejor calidad de la información. Por ello, Stimets ha comenzado recientemente a sustituir la registradora de banda de su equipo por una calculadora con impresora a la que se ha añadido el circuito que se representa en la figura 9. Este circuito, proyectado por Cesare C. DeLizza, de la Universidad de Lowell, consiste en un oscilador de cristal y dos divisores que producen un pulso por se-



9. Circuito para un ordenador con impresora

gundo. Stimets introduce un contaje inicial en la calculadora y cierra el interruptor S1. Desde ese instante, el oscilador añade una cuenta por segundo a la calculadora.

Un circuito dual basculante ("flip-flop") controla el pluviómetro. Cada vez que éste provoca un cortocircuito con un vuelco, el circuito imprime el tiempo que indica al ordenador. El instrumento posee una batería de emergencia que le permite funcionar aunque una tormenta o un descuido corte la corriente eléctrica.

El circuito de DeLizza está proyectado para un ordenador con impresora Sharp. Para montarlo se abre la calculadora y se busca el punto donde los hilos de las teclas "print" y "+=" se unen a la tarjeta del circuito impreso. Se busca también el neutro entre ambas teclas. Entonces, el hilo "print" del circuito se suelda al primer empalme de la tarjeta, el hilo "add 1" al segundo y el cable "common" al neutro entre las teclas. La conexión que en el esquema del circuito está representada por la línea de arriba debe unirse al polo positivo (cable rojo) del adaptador. a corriente alterna de la calculadora.

La conexión que en el esquema está representada por la línea inferior debe unirse al terminal negativo de la batería de la calculadora. Entre los cables rojo y blanco del adaptador se suelda un diodo 1N4001; el cátodo queda unido al cable rojo. Los elementos rotulados TIL-111 son fototransistores ópticamente acoplados.

X1 es un cristal resonante a 3,579545 megahertz. El condensador C1 se ajusta hasta que la frecuencia (medida en la patilla 7 del oscilador reloj MM5369) sea de 3,579545 megahertz. Así, el reloj dará 60 hertz. El primer circuito integrado 4017 que le sigue divide la frecuencia por 10 y el siguiente la divide por 6. La frecuencia de los pulsos que se transmiten al resto del circuito será, pues, de un hertz (un pulso por segundo).

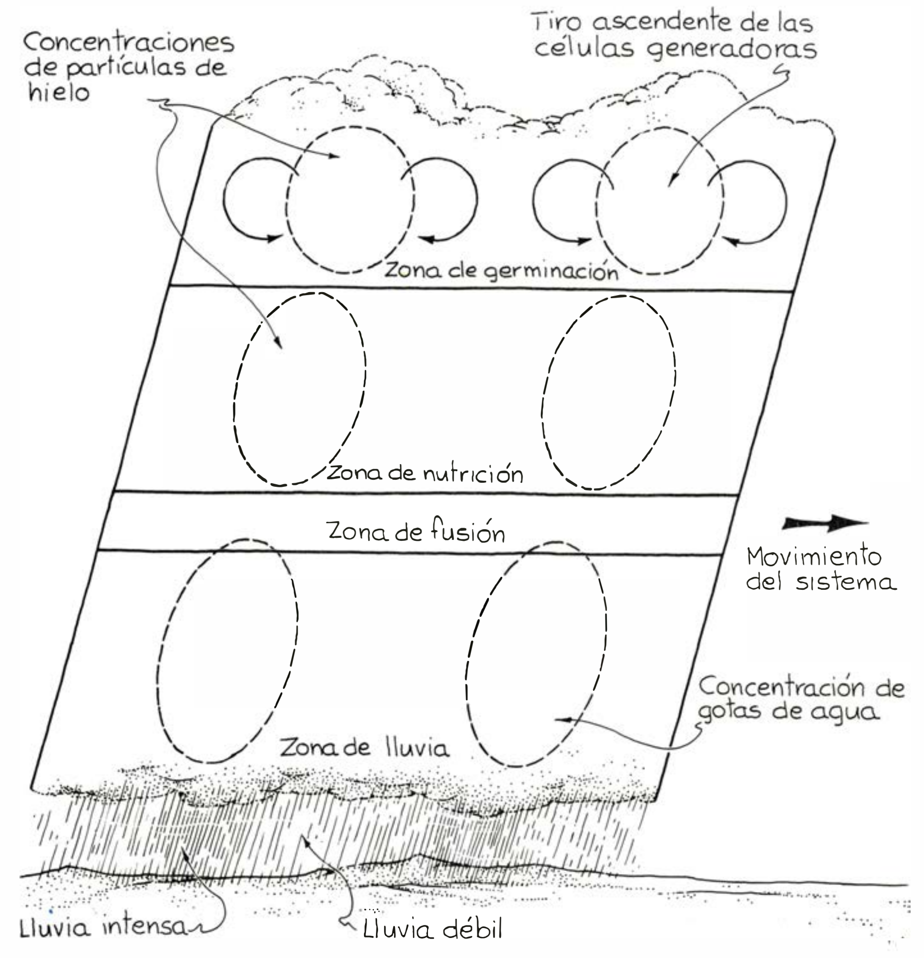
Para las variaciones en la precipitación este aparato ofrece un poder separador mayor que la registradora de banda. Stimets controla ya nubes aisladas que tardan cinco o siete minutos en pasar. Los resultados preliminares sobre el espectro de potencia sugieren que tales nubes pueden manifestarse en forma de pequeños máximos.

Stimets se halla también trabajando en la instalación de una red de pluviómetros que abarcan un gran número de colegios de la zona de Boston para observar sobre un área más extensa las tormentas y las bandas lluviosas asociadas a éstas.

A lo largo de los últimos diez años, varios grupos de investigación descubrieron estructuras periódicas en las tormentas asociadas a los frentes tanto fríos como cálidos. Peter V. Hobbs y sus asociados, de la Universidad de Washington, han estudiado la organización a grande y pequeña escala de los ciclones de latitud media. Emplean para ello una intrincada red compuesta de sistema de radar, aviones instrumentales y globos que coordinan con un sistema de estaciones en tierra.

Hobbs y su grupo estudiaron el frente frío que cruzó la red de observación el 17 de noviembre de 1976, en dirección este-sureste. En la proximidad del frente, la concentración apareció distribuida en bandas lluviosas, paralelas o aproximadamente paralelas al frente. Tales bandas mostraron tres ordenaciones diferentes.

Una de ellas abarcaba más de 50 kilómetros del sector cálido situado por delante del frente. Se componía de dos o tres bandas que viajaban más deprisa que éste, encontrándose la posterior delante mismo del frente a ras del suelo. Otra ordenación, ésta por detrás



10. Organización idealizada de las bandas lluviosas

del frente, se componía de cuatro bandas, con una anchura de varias decenas de kilómetros cada una; viajaban más deprisa que el frente. La cuarta ordenación era una banda lluviosa aislada, con una anchura de sólo cuatro kilómetros, que permanecía encima del frente.

Los puntos altos de esta banda estrecha se hallaban entre los 1,5 y los 4,5 kilómetros. Las otras bandas eran más altas; sus picos se elevaban hasta cinco y seis kilómetros. Durante las observaciones, una de las bandas anchas que seguía al frente lo alcanzó y lo adelantó, evidentemente moviéndose por encima de la banda estrecha que viajaba con él. Las bandas lluviosas del sector cálido y las que seguían al frente produjeron una precipitación concentrada a partir de núcleos de conformación irregular. La banda estrecha que acompañaba al frente poseía también núcleos, pero en ella eran elípticos y aproximadamente alineados, lo que sugería que las corrientes convectivas estaban mejor organizadas en aquellos núcleos que en cualquier otro sitio.

Las bandas lluviosas y los núcleos que seguían al frente se movían a unos 100 kilómetros por hora, velocidad igual a la del viento que predominaba en las altitudes de seis a diez kilómetros. Obviamente, el viento guiaba el rumbo de las bandas, guía también de las bandas del sector cálido. La banda de la vertical del frente se movía a la velocidad de éste (unos 65 kilómetros por hora) y no a la del viento.

En una banda del sector cálido, el aire que tenía delante ascendía rápidamente para luego fluir hacia la parte posterior. Siguiendo este movimiento, Hobbs y su grupo pudieron discernir el complicado sistema por el que se producía la lluvia. La parte superior de la banda funcionaba a modo de "zona de germinación" de partículas de hielo. Estas, una vez nucleadas, crecían por deposición de vapor de agua. Finalmente, caían en una "zona de nutrición", donde crecían aún más pegándose unas con otras, formando escarcha o recibiendo más vapor de agua. Debajo de esta zona de nutrición la temperatura aumentaba lo bastante para fundir el hielo y producir lluvia.

La estructura vertical de las bandas anchas que seguían al frente era análoga; con una salvedad: carecía de la convección a gran escala que exhibía el sector cálido que lo precedía. Como antes, las partículas se iniciaban en la zona de germinación, crecían y caían hasta fundirse y convertirse en lluvia.

En ambos conjuntos de bandas las zonas de germinación contenían regiones de tiro ascendente y de tiro descendente llamadas células generadoras. Las partículas de hielo crecían en las porciones de tiro ascendente hasta adquirir tamaño suficiente para caer fuera de la célula; podían asimismo haberse desplazado lateralmente.

Parece claro que es la organización horizontal de esas células generadoras, paralelas al frente, lo que produce la distribución cuyo resultado es la formación de las bandas lluviosas, y presumiblemente las variaciones en la precipitación detectadas por Stimets. A lo largo de una perpendicular, las células se alinean de un modo aproximadamente periódico. Por cuyo motivo las bandas lluviosas y la variación en las velocidades de caída de lluvia podrían atribuirse a la organización de las células generadoras en las zonas de germinación.

¿Pueden detectarse bandas lluviosas sin instrumentos? Imaginemos la variación en la velocidad de caída de la lluvia cuando un frente frío como el descrito por Hobbs y sus colegas pase por donde estemos. La primera lluvia que detectaremos estará en el sector cálido que precede al frente. La velocidad de caída aumentará siempre que pase por donde estemos una banda lluviosa perteneciente a ese grupo de cabeza.

Cuando el frente nos llegue, la banda acompañante soltará otro buen chaparrón. Y cuando pasen las bandas anchas que lo siguen, con cada una volveremos a recibir una lluvia intensa. Pasará por fin la última banda del sistema tormentoso y la precipitación comenzará a remitir.

De hecho la velocidad de caída de la lluvia no se mostraría organizada tan claramente. Superpuestas a la organización general habrá variaciones a pequeña escala debidas a los núcleos de precipitación formados por las células. La caída de la lluvia quedará modificada además por los vientos que surquen el espacio por el que caen las partículas. Desde el suelo se nos puede escapar la presunta organización de la precipitación mostrada por la tormenta.

¿Pueden explicarse las conclusiones de Stimets en el ámbito del frente frío estudiado por Hobbs y sus asociados? Como el primero trabajó con tormentas en el lado opuesto de América, quizá no resulte admisible tal comparación. Ello no frenó mi inquietud por averiguar si la precipitación estudiada por Hobbs mostraba alguna variación característica con el tiempo.

Me concentré en las bandas lluviosas que viajaban detrás del frente. Si supo-

nía que hubieran estado uniformemente espaciadas con un intervalo de 30 kilómetros, viajando a 100 kilómetros por hora habrían dado una variación periódica en la precipitación con un tiempo característico de unos 33 minutos. Los núcleos de precipitación interiores a las bandas estaban más densamente espaciados que las bandas. Y dado que eran de forma irregular, se hacía difícil asignarles una separación característica. Si éste era de unos 10 kilómetros, los núcleos habrían dado variaciones en la caída de lluvia con un tiempo de unos seis minutos.

Mis dos deducciones sugieren unas variaciones más rápidas que las que cabría inferir de los datos de Stimets. Las tormentas de frente frío son, empero, sumamente variables y mi comparación quizá no sea válida. Acaso las bandas lluviosas estudiadas por Hobbs y los otros investigadores se movían más deprisa que las de Stimets. Una consecuencia de una mayor velocidad sería obligadamente unas variaciones más acusadas en la caída de lluvia.

Hobbs y un antiguo alumno suyo, Paul H. Herzberg, han informado acerca de unas estructuras mucho más pequeñas, semejantes a bandas lluviosas, que se encuentran cerca de los frentes cálidos. Las observaciones con radar revelaron unas bandas onduladas que se formaron cerca de un frente cálido estacionario que se extendía hacia el este y el oeste. Las mismas eran paralelas al frente, de unos ocho kilómetros de ancho y separadas entre sí unos 12.

Hobbs y Herzberg descubrieron que aquellas bandas se originaban a partir de células generadoras en una zona de germinación. Las células yacían en una perpendicular al frente. Las porciones de tiro ascendente de las células favorecían la formación de partículas de hielo. Así el ordenamiento de células generadoras, toscamente periódico, inspiraba la formación de bandas lluviosas.

Puede ser entretenido construir un pluviómetro como el de Stimets. ¿Presentan las tormentas que pasan por donde vive el lector unas bandas lluviosas susceptibles de ser registradas por el pluviómetro? ¿Muestran tiempos característicos del tipo detectado por Stimets? Una red de pluviómetros desplegados en unos pocos centenares de kilómetros puede permitir el rastreo de las bandas. Tanto a Stimets como a mí nos interesará saber de sus resultados. Las preguntas sobre detalles en torno a las investigaciones de Stimets pueden dirigírsele al Departamento de Física de la Universidad de Lowell, Lowell, Mass. 01854.

Libros

Orígenes del álgebra y la filosofía y metateoría de la naturaleza

Javier de Lorenzo, J. Ferrater Mora y L. Alonso

ELS ORIGENS I L'ENSENYAMENT DE L'ÁLGEBRA SIMBÓLICA (1478-1545), por A. Malet y J. Paradis. ICE Universitat de Barcelona, 1984. Son varios los objetivos que pretenden los autores con este libro. Por un lado, una aproximación histórica a los orígenes y cristalización del álgebra y su lenguaje propio, que estiman se produce entre finales del siglo XV y la publicación de la *Geometría*, 1637, por Descartes; aunque en el libro ahora publicado sólo se alcance la mitad, más o menos, del período prometiendo un segundo volumen para el segundo período. Por otro lado, aplicar esta aproximación a la didáctica y metodología de la matemática y ello de acuerdo con una postura previa: suprimir la visión que se da en la enseñanza –no se indica a qué nivel– de ser la matemática una disciplina esencialmente lineal, mera cadena de resultados obtenidos a partir de unos axiomas y según unas reglas de inferencia lógicas. Los autores parten de una concepción que denominan genética, visión en la que adoptan una frase de Poincaré según la cual el desarrollo intelectual de un individuo, su proceso de adquisición de conocimientos, reproduce *grosso modo* los diferentes estadios históricos de la evolución del conocimiento humano. Con esta visión de partida –que adoptan sin más, a pesar de las dificultades que encierra–, el primer objetivo queda supeditado al segundo: la historia de las matemáticas deja de ser, según los autores, una disciplina ligada a mera erudición para convertirse en un instrumento al servicio de la metodología y didáctica de la matemática y, con ella, al servicio de la constitución intelectual de los individuos. La historia va a proporcionar ideas utilizables para las ideas didácticas y, con ello, posibilitará una enseñanza más apropiada para transmitir "la *il·lusió* de crear que no pas de provocar l'avorriment dels espectacles incomprensibles" (p. 6, subr. mío).

Desde estos planteamientos previos, los autores dividen el libro en cuatro partes bien diferenciadas. La primera es una aproximación histórica que va desde la aparición de los primeros libros impresos de "matemática" hasta la mitad del siglo XVI, hasta 1545 en que se editó *Ars magna* de Cardano, considerada de modo ya clásico como una de las primeras obras en la cual el álgebra aparece como una rama especial de las matemáticas, como el estudio específico de la resolución de ecuaciones. La segunda parte se concentra en unas consideraciones sobre el origen de algunos conceptos aritméticos y geométricos. La tercera constituye la parte en la cual los autores realizan su propuesta para una enseñanza genética del álgebra elemental. Y la cuarta y última parte se centra en el enunciado de una serie de problemas recogidos de distintos autores y obras tanto medievales como renacentistas, incluyendo a Diofanto y Beda.

Los criterios seguidos para componer esta última parte son dos: tanto su interés histórico como su posible utilización como material para la clase. En ello siguen la tradición de algunos libros de historia ya no tan recientes como el de Colette –reseñado en estas páginas– pero con el interés de haber seleccionado ejercicios de obras tanto catalanas como castellanas. En cuanto a la segunda y tercera parte ya he indicado la posición de los autores. El criterio metodológico postulado es el de realizar un enfrentamiento directo con los problemas más importantes y no la mera exposición ordenada de un contenido. Con ello se pretende que el alumno sea el "descubridor" de las soluciones y, más importante, de los métodos, a esos problemas. Como sugerencias se desarrollan algunos temas; así, los números quebrados, y se esboza un posible desarrollo heurístico con la dialéctica "alumno-profesor". En este esquema es interesante observar los continuos "desilusión general", "no saben explicar", "falta un método"... atribuido a los alumnos y las imprescindibles intervenciones del profesor que ha de ir sorteando las dificultades, canalizando las "invenciones" de los alumnos para, al finalizar, recapitular y sintetizar (pp. 197-202).

El método heurístico sigue siendo el engaño metodológico supremo: hacer creer al alumno que es él quien descubre el Mediterráneo. Es un método apoyado en el positivismo que considera el experimento sin idea previa como básico para la construcción de la ciencia. Y no hay experimento sin marco teórico que lo posibilite. Por otro lado, tampoco se especifican las edades a las cuales aplicar este engaño metodológico, apropiado para algunas pero no para otras, adecuado para ciertos contenidos y no para otros..., aunque por los temas desarrollados parece aplicarse a los niveles de enseñanza primaria (EGB) y primer curso de la secundaria (BUP) –en el actual plan de enseñanza–. Con lo cual, los temas del hacer matemático quedan soslayados si se acepta que el cálculo elemental, así como el escribir y hablar una lengua, pertenecen a un contexto diferente. Y en cuanto a la historia no se dará tal información histórica a los alumnos, ni se les hará recorrer, auténticamente, los estadios evolutivos que se pregonan haciendo que cuenten en tablillas sumerias o en los diferentes ábacos pasando por el planteamiento de las cuestiones propias del hacer matemático propio del siglo III a.C. –con la exposición geométrica a lo Euclides– y luego las aproximaciones numéricas a la música y posteriormente a los problemas mercantiles medievales y renacentistas..., sino que, muy simplemente, el profesor adoptará de la historia aquellos temas que, desde su concepción previa, le convengan.

Por lo que respecta a la segunda parte, más ligada al enfoque histórico, y en la cual se considera el origen de algunos conceptos aritméticos y algebraicos, reconocen los autores que la lógica de los procesos históricos no suele coincidir con la ordenación lógica de lo obtenido. Es el reconocimiento ya

clásico y que formulara Reichenbach con la distinción entre lógica del descubrimiento –marginada de los terrenos conceptuales por su carácter psicológico– y lógica de la exposición. Invirtiendo la marginación neopositivista, es la última lógica la que aquí se margina y se atiende a sólo la lógica del descubrimiento, que se ve sometida a dos condicionantes: motivos externos, que los autores estiman centrados básicamente en los condicionantes sociales y económicos, y motivaciones internas, aquellas que proceden directamente de los conceptos en juego y de sus relaciones y que hacen que una teoría siga un determinado camino y no otro. Reconocen, honestamente, que son las más difíciles de tratar y describir y que un intento de explicar la constitución total del álgebra –que es el tema del libro– se escapa a su alcance.

A pesar de lo cual pretenden un esbozo de cuatro temas: evolución del concepto de número, la aparición de los números negativos, la formación del lenguaje algebraico y el concepto de ecuación polinómica. Es interesante el hecho de que los autores reconozcan que la implantación del cálculo formal va asociado a una discontinuidad epistemológica respecto al empleo del esquema geométrico (p. 174). Con lo cual se llegaría a que en el período considerado, aunque los factores externos socioeconómicos estén en el origen de algunos conceptos, existe una ausencia de lenguaje propiamente algebraico. En el fondo, la aritmética comercial sigue siendo asunto comercial hasta que no se produzca una ruptura epistemológica –en mis términos, de hace ya más de una decena de años– y con sólo los factores externos se es impotente para dar cuenta de dicha ruptura y, con ella, de la constitución de un nuevo hacer, en este caso el álgebra, con su lenguaje adecuado. Sería un tema de reflexión para el segundo volumen, así como el del papel que en esta ruptura tiene, por un lado, la limitación interna del razonamiento aritmético, por otro el papel en la cristalización de un lenguaje, álgebra o característica universal, independiente de la esquematización geométrica, fundamentante de todo el saber, corriente que tiene en Lulio uno de sus mejores representantes y que constituirá uno de los objetivos de la obra de Descartes, con la que culmina el proceso que los autores estudian en este libro.

Y es la primera parte la que muestra un gran valor en el panorama cultural español. Si en metodologías y didácticas se han dado muchas vueltas a unos y otros métodos, a sus ventajas y limitaciones, realmente faltan trabajos honestos de historia de la matemática. Muy pocos, y siempre marginados, nos hemos dedicado en España a estos temas. Y, en este punto, cabe felicitar a los dos autores por el trabajo realizado. Tras un esbozo de las aportaciones árabes en aritmética y álgebra –apoyado en los trabajos de Sánchez Pérez, entre otros–, se pasa a un capítulo sobre la tradición medieval en Europa con referencias a Nemorario, Oresme, Leonardo de Pisa... El tercer capítulo se centra en las aritméticas mercantiles, novedad en cuanto a la importancia concedida en una historia del cálculo algebraico. Aun reconociendo la ausencia de métodos propiamente algebraicos en el planteamiento y resolución de los problemas (p. 50) exponen el tratamiento siguiendo, por ejemplo, alguno de los métodos utilizados para la resolución de problemas en la *Aritmética* de Treviso –la primera impresa, 1478–, agregando otros ejemplos originales, como los adoptados de Juan de Ortega.

El capítulo 4 entra de lleno en un panorama sobre las primeras álgebras renacentistas, la *Triparty* de Chuquet, de 1484, con las distintas "escuelas": italiana y alemana, para dedicar el capítulo 5 a la obra de Chuquet que "desgraciadamente" (p. 71) no va a ser impresa y, realmente, va a tener muy escasa difusión. Obra rescatada en el siglo XIX, por lo que su influencia cabe reconocer que fue escasa. Obra en la que se alcanza el límite en cuanto a la posibilidad de los razonamientos aritméticos, límite interno que constituye una de las claves de la necesidad de buscar otros caminos. Los autores dejan constancia de su extrañeza por la escasa atención que se prestó al libro y después, en el capítulo 8, de la extraordinaria difusión de una auténtica obra "mercantil", el *Tratado* de Juan de Ortega que en menos de cincuenta años, de 1521 a 1563, ve nueve ediciones, cuando su "valor" matemático es realmente inferior. Los autores no se adaptan al elemento del salto conceptual, epistemológico, y siguen aferrados a los condicionantes externos, mercantiles, sin ver la diferencia que por otro lado llegan a entrever de los marcos en que poseen su validez propia los razonamientos aritméticos y algebraico, y por lo cual si se potencia el condicionante exterior no puede causar extrañeza alguna que la obra que se difunda sea la de Ortega y no la de Chuquet.

Tras el análisis de la obra de Chuquet, el capítulo 6 se dedica a Tartaglia y el 7 al *Ars magna* de Cardano, con lo que se cierra el período indicado por los autores. Ya en la disputa de Tartaglia con Ferrari, ya en el propio enfoque, los autores reconocen tres rasgos esenciales: los métodos algebraicos se conciben como instrumentos para la resolución general de problemas universales y no específicos. En el fondo se trata, ya, de reglas generales para resolver problemas de un mismo tipo. Y las reglas generales, que abarcan cuestiones específicas, han de apoyarse en un fundamento distinto de aquello que abarcan. Ha surgido la preocupación por una fundamentación lógica de los resultados enunciados y la búsqueda de "demostraciones" para los mismos. Y son los rasgos que van a estar presentes en la obra de Cardano. Precisamente alguno de los rasgos que van a configurar la ruptura epistemológica respecto a los planteamientos mercantiles: se ha cambiado el marco conceptual,y es lo que los autores dejan entrever sin un reconocimiento explícito. La primera parte histórica termina con un capítulo, el 8, dedicado a la aritmética y el álgebra en la Península Ibérica en el siglo XVI, panorama un tanto desolador: en él se esboza la polémica entre los historiadores de la matemática en torno a la obra de Ortega acerca de los valores obtenidos para las raíces cuadradas, así como mención de la obra de Pérez de Moya y de Pedro Núñez.

Creo que, por lo indicado, es la parte más original y valiosa del libro. Con alguna matización: no dedicar más atención a la escuela alemana y, en particular, a Stifel. Pero ya el estudio directo de los originales a los que se dedica mayor atención compensa esta y alguna que otra omisión. De esta forma cabe indicar, y con palabras de los autores "Esperem publicar ràpidament la segona part de la nostra anàlisi" (p. 6).

Debo señalar, finalmente, que el libro, además de las figuras geométricas que acompañan al texto, se completa con una serie de reproducciones de los originales consultados. Punto que, si enriquece desde el punto de vista tipográfico la obra, presenta un defecto y es que tales reproducciones se muestran, en muchos casos, excesivamente borrosas. Que esa segunda parte, esperemos que inmediata, pueda compensar este defecto tipográfico. (J. L.)

HISTORIA DE LA FILOSOFÍA, por Jesús Mosterín, Madrid; Alianza Editorial, S.A. 1. *El pensamiento arcaico* (1983); 2. *La filosofía oriental antigua* (1983); 3. *La filosofía griega prearistotélica* (1984); 4. *Aristoteles* (1984). His-

torias de la filosofía las hay en abundancia, pero la gran mayoría son como cestas de huevos que contienen idéntica mercancía, con sólo diferencias de peso y tamaño. Muy a menudo cumplen con su propósito –servir de *vademecum* a estudiantes que tienen oportunamente que arrostrar un examen, o redactar un trabajo, sobre los pitagóricos, la "metafísica" de Aristóteles, el nominalismo de Occam o la epistemología kantiana–, pero no suelen distinguirse por su originalidad, largo aliento o aportaciones eruditas.

De esta general uniformidad y discreta ejecución de propósitos se salvan algunas historias. Por ejemplo, la titulada "Ueberweg", y luego "Ueberweg-Heinze", especialmente a partir de la edición en cinco volúmenes, y ahora, a partir de la nueva edición, completamente refundida, que alcanzará un mínimo de ocho volúmenes –un monumento de erudición, con toda la típica *Gründlichkeit* germánica–; las historias de Guido de Ruggiero, Émile Bréhier o Frederick Copleston –cada una de ellas notablemente ampliada y detallada, y con puntos de vista interesantes sobre por lo menos algunos períodos o figuras–; la historia de Wilhelm Windelband, con su interesante (aunque poco convincente) organización según problemas; acaso la historia de Russell, irritante para muchos historiadores profesionales, con frecuencia destemplada pero a menudo aguda y siempre desenfadada. A estas historias, y a algunas pocas más que cabría mencionar, se agrega ahora la de Jesús Mosterín, de la que se han publicado los cuatro volúmenes indicados al comienzo y que cuando se complete contará seguramente con una buena cantidad de tomos.

Los libros de Jesús Mosterín publicados antes de su "Historia", y el aparecido al tiempo que ésta –la admirable colección de ensayos titulada *Conceptos y teorías en la ciencia*–, hacían esperar un trabajo bien informado, bien organizado y eminentemente claro. Todas estas características se reiteran en los volúmenes de la "Historia de la filosofía" hasta ahora aparecidos. A ellas se agregan dos: la originalidad de los enfoques y la sólida fundamentación histórica y filológica. Mosterín sabe bien que cada tema, y cada autor principal, y no pocos de los secundarios, merece más detallada exposición y comentario de lo que puede proporcionar una historia general, y es seguro que –como confiesa en el caso de Aristóteles– le ha asaltado en varias ocasiones la tentación de extenderse. Pero sabe asimismo dos cosas muy básicas para todo historiador de la filosofía –y aun todo historiador *tout court*–: que una historia como la que viene escribiendo tiene sus límites, y que éstos no son siempre cosa deplorable. Una historia general –de la filosofía, o de cualquier otra empresa cultural– es como un gran panorama en el cual hay que pasar por alto muchos detalles pero sólo porque de este modo es posible darse –y dar– cuenta de rasgos topográficos, de otra suerte invisibles, o no muy perceptibles.

Esta ventaja no la puede disfrutar el reseñador, que no sólo dispone de un espacio muchísimo más reducido (esto es una "Nota bibliográfica" y no un *Sammelreferat*), sino que, además, no se ocupa de un tema, o una serie de temas, más o menos conocidos de antemano y acerca de los cuales puede remitir a otros repertorios, sino de una obra reciente que se supone no conocida aún del lector. No hay más remedio, pues, que limitarse a apuntar a la carrera algunos de los rasgos más salientes de la misma.

Mosterín no se limita a la historia de la llamada "filosofía occidental", sino que empieza, muy juiciosamente, con un volumen sobre lo que titula "el pensamiento arcaico" –del que apunta varias notas capitales y que incluye no sólo los modos de pensar del "pleistoceno" y la "revolución del neolítico", sino también Mesopotamia, la sociedad y cultura indoeuropeas y la India, Grecia y China "arcaicas"–. A este volumen sigue otro sobre "la filosofía oriental antigua" (India y China). Mosterín no es (como no es el reseñador) un especialista en antropología cultural, en historia de las religiones o en ese vasto conglomerado que se suele calificar de "lenguas orientales", pero es difícil presentar mejor de lo que hace las formas de pensamiento indicado. No hay duda de que se ha valido de los mejores y más fidedignos especialistas, como lo testifican sus breves, pero siempre cuidadosas notas bibliográficas y lingüísticas, de modo que el lector tiene la confianza de que el expositor no se anda por las ramas. Esta confianza se refuerza con las numerosas y precisas referencias del autor a textos (o a inscripciones). Añádase a ello el modo de solucionar el espinoso problema de las "relaciones" entre "pensamiento" y "sociedad" o "condiciones históricas". Los "sociologistas" (para llamarlos de alguna manera) a ultranza dedican mucho espacio y tiempo a tales condiciones y relativamente poco a lo que suponen condicionado por ellas. Los historiadores de la filosofía suelen pasar rápidamente sobre las "condiciones", la "estructura social" o la "atmósfera cultural". Mosterín adopta una actitud prudente. Su "Historia" contiene numerosas referencias a "condiciones", o a "circunstancias" –geográficas, sociales, económicas, políticas, culturales, etc.–, de modo que el "pensamiento" y la "filosofía" no aparecen como flotando en el aire, sin nada que los fundamente, o por lo menos acompañe, pero siguen siendo lo importante y ocupan, como creo que debe ser, las posiciones centrales.

Los volúmenes 3 y 4 consagrados a la historia de la filosofía griegan siguen, inevitablemente, vías más transitadas, pero distan mucho de ser un mero calco de las "Historias de la filosofía" de otros autores. Para empezar, Mosterín toma en conjunto "la filosofía griega prearistotélica", dedicando a Platón 54 páginas (55, o 56, con la "Bibliografía orientativa"), a diferencia de, y casi en contraste con, las 304 consagradas a Aristóteles, objeto del entero volumen 4. Esto puede ser objeto de discusiones, sobre todo en vista de la enorme influencia platónica subsiguiente (que, como el propio Mosterín indica, alcanza plenamente a Aristóteles) y del hecho de que parezcan rastrearse en Platón prácticamente todos los problemas fundamentales que van a debatirse durante dos mil quinientos años –lo que ha llevado a Whitehead a su conocida observación de que la historia de la filosofía occidental es una serie de notas al pie a los diálogos platónicos–. Pero el que pueda discutirse esta preferencia de Mosterín, o por lo menos esta notoria diferencia en el número de páginas dedicadas a cada uno de estos dos filósofos, indica que hay buenas razones para cada uno de los participantes en un posible debate al respecto, y buenas razones también, por tanto, para Mosterín. Menos debatible es el amplio tratamiento que da Mosterín a los autores y corrientes anteriores a (y a veces coetáneos con) Platón, incluyendo –lo que es cosa poco común y que debemos agradecerle– la historiografía y la medicina hipocrática. En todas estas exposiciones y comentarios despliega el autor un sólido conocimiento de fuentes y, aparte cuestiones de detalle, no creo que pueda ser objeto de muchas críticas fundadas por parte de especialistas de la cultura y de la filosofía griegas.

El cuidado, detalle y enfoques originales alcanzan su ápice en la sección (o volumen) dedicado a Aristóteles, que merecería reseña aparte. Aunque resulta altamente satisfactorio para el lec-

tor, que sale de la lectura con la impresión de empezar a entender bien no pocos temas difíciles (y el deseo de leer directamente al autor tratado, lo que dice mucho en favor del modo como ha sido presentado), este volumen plantea al autor un problema: el de la "distribución" oportuna de espacio, y esfuerzo, a autores y corrientes posteriores. La atención prominente a grandes figuras es justificada, pero una historia de la filosofía es asimismo (como Bréhier puso de manifiesto) la historia de figuras "menores", de epígonos, de corrientes más o menos subterráneas, de toda suerte de "afluentes", etc. Esperamos con interés la solución que Mosterín vaya a dar a esta cuestión.

En las transcripciones de nombres propios, Mosterín se atiene a reglas perfectamente racionales: Anaxagoras y Aristoteles son palabras llanas; Empedoklés es palabra aguda y, además, se escribe con k; Hippokrates se escribe con dos pes y con ka; el rey persa Darío (o, mejor, Daríos) aparece como "Darayavauš"; el famoso "Tao" es (correspondiendo al modo como se pronuncia) "dào", etc. Sería deseable que todo el mundo siguiera estas reglas (como se siguen con nombres propios contemporáneos: al fin y al cabo, se escribe "Charles de Gaulle" y "Franklin D. Roosevelt", y ello sólo porque francófonos y anglófonos siguen empeñándose en sus ortografías casi frenéticamente antifonéticas, o antifonémicas), por las mismas razones que sería deseable que los hispanófonos siguieran las reglas que Mosterín propone en su libro *La ortografía fonémica del español* (1981). Por desgracia, la razón no suele ser la cosa mejor repartida entre los seres humanos (o, según Mosterín escribe, "humanes"), quizá porque, como sugería Voltaire, "la Razón" pasa la mayor parte del tiempo encerrada en el fondo de un pozo, pero si así es no vamos a sacarla de allí con la violencia, que es cosa tan poco razonable. De todos modos, esto es un asunto menor, aunque Mosterín piensa seguramente que es mayor. Mayor o menor, con sus transcripciones tan racionales, o sin ellas, la "Historia de la filosofía" de Jesús Mosterín es una obra de gran empuje y muchos quilates. Hace honor a la lengua y a la cultura en cuyo seno se está publicando. (J. F. M.)

FILOSOFIA DE LA NATURALEZA, por Mariano Artigas y Juan José Sanguineti. Editorial de la Universidad de Navarra, Pamplona 1984. Nos hallamos ante el sexto título de una serie de libros de iniciación que introducen al estudiante y a la persona interesada en el mundo de la filosofía. Los autores de éste son dos profesores de la disciplina en distintos centros universitarios con años en la docencia. Artigas, que dio clases en la Universidad de Barcelona, posee, además del doctorado en filosofía, otro doctorado en ciencias físicas por esa misma institución.

Tras el llamado círculo de Viena, lugar de convergencia de distintos expertos unidos por el común afán de poner la filosofía en la senda de la ciencia contrastable, se produjo un fuerte desplazamiento de lo que se venía considerando filosofía de la naturaleza a la filosofía de la ciencia. Se dejaba al discurso filosófico la mera consideración de la metodología científica: la naturaleza de los conceptos, la explicación, el estatuto lógico de las teorías, el carácter determinista de la mecánica clásica (si de un tema físico se trataba) o la explicación teleológica (si de un tema biológico). Sus propugnadores se instalaban en una atalaya "metacientífica" o de reflexión rigurosa sobre el quehacer de la ciencia.

Pronto se vio que para subir a tales alturas convenía andar seguro en los peldaños inferiores, so pena de quedarse en la periferia terminológica. De ahí el largo excursus biológico del propio Ernest Nagel en *La estructura de la ciencia*, o el capítulo dedicado a la "Filosofía de la Biología" por Mario Bunge en su libro *Epistemología*. Aquél fiábase en la lectura de J. H. Woodger, aunque sus planteamientos latían en la onda arcaica de Jacques Loeb; Bunge, que se mueve en esta misma línea positivista, resulta más decepcionante por cuanto parece desconocer lo que ha llovido de entonces acá; suya es la perla siguiente entre otras de jaez parecido: "se ha averiguado el mecanismo general de la transformación de las especies". ¡Qué más quisieran los biólogos que conocer si la evolución es algo gradual o instantáneo (en términos geológicos), que saber el papel que en la misma desempeñan las mutaciones, la deriva genética, la propia selección, etcétera!

Artigas y Sanguineti se han aventurado por otra vía. Distinguen entre metaciencia, disciplina que incardinan en la lógica y filosofía del conocimiento, y a ella remiten por haber publicado un volumen sobre el asunto en esta colección, y filosofía de la naturaleza propiamente dicha. Y, para ésta, han escogido un camino de largo origen: han repensado las categorías de Aristóteles con el bagaje de la física de nuestro tiempo. (L. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ASIMILACION DEL CARBONICO POR LA PLANTA

THE REDUCTIVE PENTOSE PHOSPHATE CYCLE AND ITS REGULATION. James A. Bassham en *Photosynthesis II*, págs. 9-30. Dirigido por M. Gibbs y E. Latzko. Springer-Verlag, 1979.

THIOREDOXIN AND ENZYME REGULATION. Bob B. Buchanan, Ricardo A. Wolosiuk y P. Schûrmann en *Trends in Biochemistry*, vol. 4, págs. 93-96; 1979.

ROLE OF LIGHT IN THE REGULATION OF CHLOROPLAST ENZYMES. Bob B. Buchanan en *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 31, págs. 341-374; 1980.

CHLOROPLAST METABOLISM. Barry Halliwell. Oxford Science Publications, 1981.

LIGHT-DARK MODULATION OF ENZYME ACTIVITY IN PHOTOSYNTHESIS. Louise E. Anderson, Anthony R. Ashton, A. H. Mohamed y Renate Scheibe en *Bioscience*, vol. 32, págs. 103-107; 1982.

THIOREDOXIN/FRUCTOSE-1,6-BISPHOSPHATE AFFINITY IN THE ENZYME ACTIVATION BY THE FERREDOXIN-THIOREDOXIN SYSTEM. Antonio Plá y Julio L. Gorgé en *Thioredoxins. Structure and Functions*, págs. 183-190. Dirigido por P. Gadal. Editions du CNRS; Paris, 1983.

COLAPSO Y FORMACION DE ESTRELLAS

PROTOSTARS AND PLANETS: STUDIES OF STAR FORMATION AND OF THE ORIGIN OF THE SOLAR SYSTEM. Dirigido por Tom Gehrels. University of Arizona Press, 1978.

HYDRODYNAMIC COLLAPSE. Joel E. Tohline en *Fundamentals of Cosmic Physics*, vol. 8, n.° 1, págs. 1-82; diciembre, 1982.

PERCEPCION DEL HABLA EN LA PRIMERA INFANCIA

INFANT SPEECH PERCEPTION: A CRITICAL APPRAISAL. P. W. Jusczyk en *Perspectives of the Study of Speech*, dirigido por Peter D. Eimas y Joanne L. Miller. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1981.

ON FINDING THAT SPEECH IN SPECIAL. Alvin M. Liberman en *American Psychologist*, vol. 37, n.° 2, págs. 148-167; febrero, 1982.

ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

BIOLOGICAL ASPECTS OF ALZHEIMER'S DISEASE (BANBURY REPORT 15). Dirigido por Robert Katzman. Cold Spring Harbor Laboratory, 1983.

CHOLINE AND CHOLINERGIC NEURONS. Jan K. Blusztajn y Richard J. Wurtman en *Science*, volumen 221, n.° 4611, páginas 614-620; 12 de agosto de 1983.

ALZHEIMER'S DISEASE: ADVANCES IN BASIC RESEARCH AND THERAPIES. Dirigido por Richard J. Wurtman, Suzanne H. Corkin y John H. Growdon. Center for Brain Sciences and Metabolism Charitable Trust, P.O. Box 64, Cambridge, Mass.; 1984.

MATERIA NUCLEAR CALIENTE

COLLECTIVE SIDEWARD FLOW OF NUCLEAR MATTER IN VIOLENT HIGH-ENERGY HEAVY-ION COLLISIONS. Horst Stöcker, Joachim A. Maruhn y Walter Greiner en *Physical Review Letters*, vol. 44, n.° 11, págs. 725-728; 17 de marzo de 1980.

DENSITY PATTERNS AND ENERGY-ANGLE DISTRIBUTIONS FROM A SIMPLE CASCADE SCHEME FOR A FAST ^{20}NE + ^{238}U COLLISIONS. E. C. Halbert en *Physical Review C*, vol. 23, n.° 1, págs. 295-330; enero, 1981.

COMPRESSION EFFECTS IN RELATIVISTIC NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS. R. Stone, R. Bock, R. Brockman, J. W. Harris, A. Sandoval, H. Stroebel, K. L. Wolf, H. G. Pugh, L. S. Schroeder, M. Maier, R. E. Renfordt, A. Dacal y M. E. Ortiz en *Physical Review Letters*, vol. 49, n.° 17, págs. 1236-1239; 25 de octubre de 1982.

FIABILIDAD DE LAS MEMORIAS DE ORDENADOR

SOFT ERRORS IN VLSI: PRESENT AND FUTURE. Timothy C. May en *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. CHMT-2, n.° 4, págs. 377-387; diciembre, 1979.

ERROR-CORRECTING CODES FOR SEMICONDUCTOR MEMORY APPLICATIONS: A STATE-OF-THE-ART REVIEW. C. L. Chen y M. Y. Hsiao en *IBM Journal of Research and Development*, volumen 28, n.° 2, págs. 124-134; marzo, 1984.

NATACION POR PROPULSION A CHORRO EN EL CALAMAR

SQUID MANTLE MUSCLE. Q. Bone, A. Pulsford y A. D. Chubb en *Journal of the Marine Biological Association of the U.K.*, vol. 61, n.° 2, págs. 327-342; 1 de mayo de 1981.

RESPIRATORY METABOLISM AND SWIMMING PERFORMANCE OF THE SQUID, *LOLIGO OPALESCENS*. R. K. O'Dor en *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 39, n.° 4, págs. 580-587; abril, 1982.

THE ROLE OF ELASTIC ENERGY STORAGE MECHANISMS IN SWIMMING: AN ANALYSIS OF MANTLE ELASTICITY IN ESCAPE JETTING IN THE SQUID, *LOLIGO OPALESCENS*. John M. Gosline y Robert E. Shadwick en *Canadian Journal of Zoology*, vol. 61, n.° 6, págs. 1421-1431; junio, 1983.

LA BALLESTA

THE CROSSBOW, MEDIAEVAL AND MODERN, MILITARY AND SPORTING: ITS CONSTRUCTION, HISTORY AND MANAGEMENT. Ralph Payne-Gallwey. Bramhall House. New York, 1958.

CROSSBOWS: "FROM THIRTY-FIVE YEARS WITH THE WEAPON". George M. Stevens. Crossbow Books, Huntsville, Ark.; 1978.

JUEGOS DE ORDENADOR

UNDERSTANDING NATURAL LANGUAGE. Terry Winograd. Academic Press, 1972.

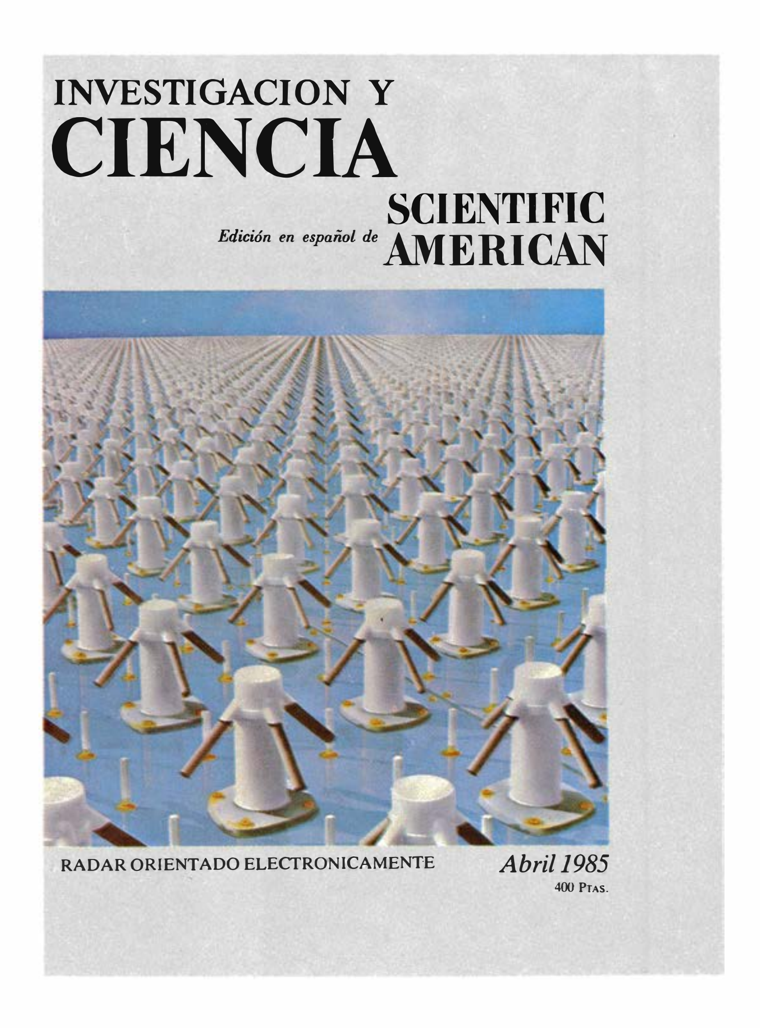
EXPERIMENTS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SMALL COMPUTERS. John Krutch. Howard W. Sams & Co., Inc., 1982.

THE POLICEMAN'S BEARD IS HALF-CONSTRUCTED. Racter, con una introducción por William Chamberlain. Warner Books, Inc., 1984.

TALLER Y LABORATORIO

THE MESOSCALE AND MICROSCALE STRUCTURE AND ORGANIZATION OF CLOUDS AND PRECIPITATION IN MIDLATITUDE CYCLONES, 2: WARM-FRONTAL CLOUDS. Paul H. Herzegh y Peter V. Hobbs en *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 37, n.° 3, págs. 597-611; marzo, 1980.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



FUENTES EXPLOSIVAS DE RAYOS GAMMA, por Bradley E. Schaefer
En el cielo aparecen, de forma imprevisible, intensos destellos de radiación de alta energía. La escasez de datos ha hecho inútil todo intento de precisar su causa.

EL MOVIMIENTO BROWNIANO, por Bernard H. Lavenda
La observación del recorrido aleatorio de una partícula suspendida en un fluido condujo a la primera medición precisa de la masa del átomo.

EXITO REPRODUCTOR DEL CIERVO COMUN, por T. H. Clutton-Brock
El estudio de un millar de esos animales gregarios, desarrollado durante 12 años en una reserva escocesa, nos desentraña su causa.

SUSTITUCION FUNCIONAL DEL OIDO, por Gerald E. Loeb
Las prótesis implantables diseñadas para transmitir estímulos eléctricos directamente al nervio auditivo abren las esperanzas de quienes sufren un tipo de sordera derivada de la lesión de ciertas células del oído interno.

LOS ACEROS DE DAMASCO, por Oleg D. Sherby y Jeffrey Wadsworth
Contenían más carbono que la mayoría de los aceros modernos. Esa característica, junto con un hábil forjado, explican su célebre resistencia y tenacidad.

ASI CAMBIA *TRYPANOSOMA* SU CUBIERTA, por John E. Donelson y Mervyn
El parásito, que priva de carne y leche a gran parte de Africa, sobrevive en el torrente sanguíneo evadiendo el sistema inmunitario. Su truco consiste en expresar genes nuevos, que codifican antígenos de superficie diferentes.

RADARES DE BARRIDO ELECTRONICO, por Eli Brookner
Puede seguir, o buscar, objetos sin mover su antena. Para dirigir el haz aprovecha la interacción entre ondas de las señales procedentes de múltiples elementos que componen la antena.

YACIMIENTOS AURIFEROS IBERICOS EN LA ANTIGÜEDAD, por Luis C. Pérez y F. J. Sánchez-Palencia
Durante los primeros siglos de nuestra era, el Imperio Romano removió más de 600 millones de metros cúbicos de terrenos auríferos en el noroeste de la península ibérica.

